激动人心的年代

激动人心的年代

04
304(2)

VISIT…

激动人心的年代

世纪之交物理学革命的历史考察和哲学探讨

李亚民 著

四川人民出版社

一九八八年·成

XWTS 0017768

特约编辑：何维凌

责任编辑：傅世悌
封面设计：刘　溢
插　　图：李少文

走向未来丛书
激动人心的年代　　李醒民　著

四川人民出版社出版　（成都盐道街三号）
四川省新华书店发行　自贡新华印刷厂印刷

开本787×960毫米1/32　印张10.5　插页5　字数153千
1983年11月第一版
1984年6月第二版　1984年6月第二次印刷
印数：15,201—74,200册

书号：2118·12　定价：1.03元

编者献辞

《走向未来》丛书和读者见面了。

她凝聚着我们的心血和期望。

我们期待她能够：展现当代自然科学和社会科学日新月异的面貌；反映人类认识和追求真理的曲折道路；记录这一代人对祖国命运和人类未来的思考。

我们的时代是不寻常的。二十世纪科学技术革命正在迅速而又深刻地改变着人类的社会生活和生存方式。人们迫切地感到，必须严肃认真地对待一个富有挑战性的、千变万化的未来。正是在这种历史关头，中华民族开始了自己悠久历史中又一次真正的复兴。

在艰苦而又富有生命力的改革道路上，我们坚

F602 bE

定了马克思主义的信仰，理解了科学的价值，并逐步深化了对我们时代和民族的认识。今天，我们听从祖国的召唤，热情地投身于实现社会主义现代化的伟大潮流。

马克思有一句名言："思想的闪电一旦真正射入这块没有触动过的人民园地，德国人就会解放成为人。"* 今天，照亮我们民族的思想闪电，就是马克思主义、科学精神和我们民族优秀传统的结合，以及由此开始的创新！

在中国社会科学院青少年研究所领导下，我们编辑了这套《走向未来》丛书。

她力图从世界观高度把握当代科学的最新成就和特点，通过精选、咀嚼、消化了的各门学科的知识，使读者特别是青年读者能从整个人类文明曲折的发展和更迭中，理解中华民族的伟大贡献和历史地位，科学地认识世界发展的趋势，激发对祖国、对民族的热爱和责任感。

她特别注重于科学的思想方法和新兴的边缘学科的介绍和应用；把当前我国自然科学、社会科学、以及文学艺术方面创造性的成果，严肃地介绍

* 《马克思恩格斯选集》，人民出版社，1975年版，第1卷，第15页。

给社会，推动自然科学与社会科学的结合。

《丛书》是个新的园地，她将自始至终贯彻严肃认真的学风和生动活泼的文风。

《走向未来》丛书，从她一开始就受到老一辈共产党人关怀，受到学术界前辈的热情支持。

约四百年前，弗兰西斯·培根在《伟大的复兴》一书序言中，曾经这样谈到书中描述的对象，他"希望人们不要把它看作一种意见，而要看作是一项事业，并相信我们在这里所做的不是为某一宗派或理论奠定基础，而是为人类的福祉和尊严……。"我们怀着真挚的感情，把这段话献给《丛书》的读者，希望广大读者关心她、批评她、帮助她。

让她成为我们共同的事业。

《走向未来》丛书编委会

一九八三年六月于北京

引　言

十九世纪末二十世纪初，在物理学领域内爆发了一场举世瞩目的大革命。在不太长的时间内，一系列新实验和新理论，涤荡了经典力学的理论基础，揭开了现代物理学的序幕，谱写了科学史上的最壮丽的篇章。

这是一个激动人心的年代，是一个需要巨人而且产生了巨人的时代。在以爱因斯坦为首的一批卓越的物理学家的持续努力下，相对论、量子力学相继出现，为二十世纪物理学的进一步发展奠定了坚实的基础。这次革命的成果还渗透到天文学、化学、生物学等自然科学领域，极大地推动了这些学科的迅猛发展，而且导致了许多新兴的交叉学科和边缘学科（天体物理学、宇宙学、量子化学、生物物理

学、分子生物学等）的诞生。二十世纪中叶相继出现的尖端技术，诸如原子能、半导体、激光、超导、遥感遥测、航天技术等，也是在物理学革命的丰硕成果基础上建立和发展起来的，这大大促进了现代化生产的进展和人类社会生活的变革。

这次革命，还大大变革了人们的世界观（物质观、运动观、时空观等）和思维方式。奇妙的原子结构、抽象的四维世界和弯曲时空、神秘的量子跃迁、意义深远的波粒二象性和质能关系式，诸如此类的新理论如象后春笋一样破土而出。它们“推翻了一切关于最终的绝对真理和与之相应的人类绝对状态的想法”（《马克思恩格斯选集》第4卷，人民出版社，1972年第一版，第213页），它们无可辩驳地证明：“一切僵硬的东西溶化了，一切固定的东西消散了，一切被当作永久存在的特殊东西变成了转瞬即逝的东西”（恩格斯：《自然辩证法》，人民出版社，1971年第一版，第15—16页）。物理学革命的丰硕成果为丰富和发展辩证唯物主义奠定了坚实的基础，提供了宝贵的材料。

世纪之交的这次物理学革命，是物理学的黄金时代，它所经历的时间如此短暂，所获得的成果如此宏伟，可以毫不夸张地说，这在科学史上是罕见

的。因此，考察一下这次革命的历史，从哲学上探讨一些与之有关的问题，无疑是件饶有兴味的工作。本书的着眼点就在于此。[1]

目　录

引言 …… 1

第一章　经典力学和经典物理学的神圣庙堂…… 1

1.1　牛顿和他的《自然哲学的数学原理》…… 3

1.2　经典力学的完善与机械自然观 …… 6

1.3　经典物理学的发展 …… 9

1.4　“未来的物理学真理将不得不在小数点后第六位去寻找” ……12

第二章　不识庐山真面目　只缘身在此山中……17

2.1　牛顿的历史局限性……19

2.2　经典物理学与经典力学的潜在矛盾……22

2.3　不识庐山真面目　只缘身在此山中……26

第三章　把经典力学的基本概念从奥林帕斯山上拉下来……31

3.1 历史背景……33
3.2 马赫小传……35
3.3 马赫在《力学及其发展的批判历史概论》
中对经典力学的批判……37
3.4 马赫是在敲着敞开的大门吗？……47
3.5 物理学革命行将到来的先声……49

第四章 山雨欲来风满楼……55
4.1 以太之谜和迈克耳孙-莫雷实验……57
4.2 经典能量均分定理面临困境……63
4.3 物理学上空的“两朵乌云”……66
4.4 山雨欲来风满楼……69

第五章 危机是革命的前夜……73
5.1 彭加勒论物理学危机……76
5.2 彭加勒简历……86
5.3 还彭加勒以历史的本来面目……89

第六章 1895年：物理学革命的序幕……95
6.1 真空放电和阴极射线……98
6.2 伦琴和他的新射线——X射线……101
6.3 贝克勒耳和放射性的发现……107
6.4 电子存在的确证……114
6.5 居里夫妇发现了新的放射性元素……122
6.6 卢瑟福和索迪提出嬗变理论……126

6.7 原子结构模型 ……130

第七章 爱因斯坦开拓了一个奇妙的新世界……133

7.1 相对论的先驱：洛伦兹与彭加勒 ……136

7.2 爱因斯坦的思想发展 ……144

7.3 狭义相对论是一种崭新的理论 ……150

7.4 普朗克的庇护和闵可夫斯基的四维世界 ……166

7.5 保卫以太 ……170

7.6 广义相对论的建立和实验验证 ……173

第八章 “自然无飞跃”古老格言的彻底破灭 ……187

8.1 黑体辐射和普朗克量子的引入 ……189

8.2 爱因斯坦的光量子和固体比热理论 ……200

8.3 第一届索耳未会议 ……209

8.4 玻尔的原子结构理论 ……213

8.5 对应原理 ……222

8.6 海森伯的矩阵力学 ……226

8.7 德布罗意的物质波和薛定谔的波动力学 ……230

8.8 狄喇克的综合 ……240

8.9 关于量子力学诠释的争论 ……242

第九章 谁是革新派？谁是保守派？……253

9.1 机械学派（力学学派）和批判学派 ……255

9.2 两种历史作用 ……258

9.3 不同的哲学根源 ……266
9.4 历史的必然道路 ……270
第十章 历史是一面最好的镜子 ……279
作者后记 ……309

第一章

经典力学和经典物理学的神圣庙堂

1.1 牛顿和他的《自然哲学的数学原理》

1687年，艾萨克·牛顿(Issak Newton,1643-1727)经过多年的潜心研究，终于出版了他的《自然哲学的数学原理》（以下简称《原理》），它标志着物理学的真正诞生。

牛顿这位集实验家、理论家、机械师和讲解能手于一身的大师，出生在英国林肯郡的一个农民家庭里。他从小喜欢手工劳动，他做的风车、风筝、日晷、漏壶等都十分精巧。他早年在学校里并未表

现出将来要成为伟人的任何迹象。他生性腼腆，体弱多病，学习也很落后，为此常受到一个"小霸王"的欺侮。但是，牛顿却有过人的意志和刚毅的精神，他横下一条心与"小霸王"干了一仗，结果把那个家伙狠狠揍了一顿。体力上的胜利增强了他的自信心。他下定决心要在智力搏斗中全面获胜，经过艰苦卓绝的努力，他终于在班上名列前茅。

十八岁时，牛顿说服了想让他务农的母亲，进入剑桥三一学院专攻数学。1665年，他获取 了学士学位，但是还没有什么突出的作为。

1665年仲夏，大规模的瘟疫在伦敦流行，牛顿只好回到他的故乡避难。在乡下居住的十八个月是他一生中硕果累累的时期。他发现了二项式定理、正切方法、直接流数法及其逆运算（即微积分），思考了力学原理和引力问题。

二十六岁时，牛顿被任命为剑桥大学的教授，三十岁时被选为皇家学会的会员，这是英格兰最高的科学荣誉。据牛顿的传记作者说，牛顿是一个呆心教授的典型。他"从不作任何娱乐和消遣，他不骑马外出换换空气，不散步不玩球，也不做其他任何运动，认为不花在研究上的时间都是损失。"他经常"穿着一双磨掉了后跟的鞋，袜子乱糟糟，披

着衣裳，头也几乎不梳。”在剑桥期间，他每天工作到半夜三更，一直致力于发展他在乡居时孕育出的光辉思想，但是他却长期秘而不宣，直到1687年夏，才在《原理》中公诸于世。

《原理》是人类的自然科学知识的首次大综合，在这里，牛顿把伽利略（Galileo Galilei，1564-1642）“地上的”物体运动规律与开普勒（Johannes Kepler，1571-1630）“天上的”星球运动规律天才地统一起来，建立了牛顿力学（也称经典力学或古典力学）的完整理论体系。

牛顿抛弃了亚里士多德（Aristoteles，公元前384-322）的天地截然不同的信条，澄清了自亚里士多德以来一直含混不清的力和运动的观念，明确了时间、空间、质量、动量等基本的物理概念。他以运动三定律和万有引力定律为主线，以他发明的微积分为工具，巧妙地构造出他的力学体系。牛顿力学既成功地描述了天上行星、卫星、彗星的运动，又完满地解释了地上潮汐和其他物体的运动。在牛顿之前，还没有一个关于物理因果性的完整体系能够表示经验世界的任何深刻特征。

1.2 经典力学的完善与机械自然观

牛顿力学的辉煌成就，使其得以决定后来物理学家的思想、研究和实践的方向。《原理》采用的是欧几里得几何学的表述方式，处理的是质点力学问题，以后牛顿力学被推广到流体和刚体，并逐渐发展成严密的解析形式。1736年，欧勒(Leonhardt Euler，1707-1783)写成了《力学》一书，把牛顿的质点力学推广到刚体的场合，引入了惯量的概念，论述了刚体运动的问题。1738年，伯努利(Daniel Bernoulli，1700-1782)出版了《流体力学》，解决了流体运动问题。达朗伯(Jean Lerond d'Alembert，1717-1783)进而于1743年出版了《力学研究》，把动力学问题化为静力学来处理，提出了所谓达朗伯原理。莫培督(Pierre Louis Marquis de Maupertuis，1698-1759)接着在1744年提出了最小作用原理。把解析方法进一步贯彻到底的是拉格朗日(Joseph Louis Lagrange，1736-1813)1788年的《分析力学》和拉普拉斯(Pierre Simon Marquis de Laplace，1749-1827)的《天体力学》(在1799-1825年间完成)。前者虽说是力学书，可是

没有画一张图，自始至终采用的都是纯粹的解析法，因而十分出名，运用广义坐标的拉格朗日方程就在其中。后者专门用牛顿力学处理天体问题，解决了各种各样的疑难。《分析力学》和《天体力学》可以说是经典力学的顶峰。在分析力学方面做出杰出贡献的还有其他一批人，他们使经典力学在逻辑上和形式上更加令人满意。就这样，经过牛顿的精心构造和后人的着意雕饰，到十八世纪初期，经典力学这一宏伟建筑巍然矗立，无论外部造型之雅致，还是内藏珍品之精美，在当时的科学建筑群中都是无与伦比的。

经典力学理论体系的完美和实用威力的强大使物理学家深信，天地四方、古往今来发生的一切现象都能够用力学来描述。只要给出系统的初始条件，就能够毫无遗漏地把握它的因果性链条。牛顿早在《原理》中就把宇宙看成符合力学原理的机械图象。他在该书第一版的“序言”中写道，正如用万有引力推演出行星、彗星、月球和潮汐的运动一样，“我希望能够用同样的方法从力学原理推导出自然界的其他许多现象”。另一位同时代的科学泰斗惠更斯(Christian Huygens,1629–1695)在1690年说：“在真正的哲学里，所有自然现象的原因都

应该用力学用语来思考，依照我的意见，我们必须这样做”。拉普拉斯在1812年所著的《概率解析理论》的绪论中，更是典型地道出了机械决定论的特征。他说：“我们必须把目前的宇宙状态看作是它以前状态的结果及其以后发展的原因。如果有一种智慧能了解在一定时刻支配着自然界的所有的力，了解组成它的实体的各自的位置，如果它还伟大到足以分析所有这些事物，它就能够用一个单独的公式概括出宇宙万物的运动，从最大的天体到最小的原子，都毫无例外，而且对于未来，就象对于过去那样，都能一目了然。”物理学家由于确信这样的决定论，终于完全和上帝断绝了关系。据说，拉普拉斯把《天体力学》奉献给拿破仑皇帝时，拿破仑问道：“你为什么在书中不提上帝？”拉普拉斯自傲地回答：“陛下，我不需要那种假设！”

就象给拉普拉斯的断言作证一样，经典力学的神奇力量通过海王星的发现戏剧性地表现出来。1781年后，随着对天王星观测资料的积累，人们发现它实际运行与理论计算结果不一致。即使考虑到其他行星的影响加以修正，也依然难以消除偏差。为此，巴黎天文台台长阿拉哥（Dominique Francois Arago,1786-1853）启发年轻的天文学家勒维

烈（Urbain Jean Joseph Leverrier, 1811-1877），让他依据“逆摄动”（即给出一个摄动，求引起摄动的行星）计算未知行星的大小和位置。勒维烈经过一年时间的努力，终于在1846年8月31日把新行星的位置、光度等计算值送交给各国天文台。二十三天后，柏林天文台的加勒（Johann Gottfried Galle, 1812-1910）在预言的区域内发现了这颗未知的新行星，它就是海王星。其实，早在勒维烈的前一年，年轻的英国天文学家亚当斯（John Couch Adams, 1819-1892）就计算出了结果，只是因为没有及时观测而失去了取得优先权的机会。

1.3 经典物理学的发展

经典力学不可思议的成功使人们无条件地接受了这一理论，把它看作是科学解释的最高权威和最后标准。而且直到十九世纪末，它一直充当着物理学家在各个领域中的研究纲领。人们普遍认为，经典力学是整个物理学的基础，只要把经典力学的基本概念和基本原理稍加扩充，就能够处理面临的一切物理现象。情况正如亥姆霍兹（Hermann von Helmholtz, 1821-1894）1847年在《论力的守恒》

中所说的："我们最终发现，所有涉及到的物理学问题都能归结为不变的引力和斥力"，"只要把自然现象简化为力，科学的使命就终结了"。他宣称："整个自然科学的最终目的溶化在力学之中。"当时，在物理学家中间，出现了"把一切都归结为机械运动的狂热"。（恩格斯：《自然辩证法》，人民出版社，1971年第一版，第225页）。

声学在早期几乎是独立地发展的，自牛顿以后，力学原理首先被顺利地应用于声学研究，声音被看成是在弹性介质中传播的机械振动。热学是继经典力学之后发展起来的又一个成功的理论体系。热现象的研究起初是以"热质"这一力学模型为先导的。十九世纪中叶，克劳修斯（Rudolf Emanuel Clausius，1822-1888）、麦克斯韦（James Clerk Maxwell，1831-1879）、玻耳兹曼（Ludwig Boltzmann，1844-1906）等人利用统计方法，把热学中的宏观物理量归结为与之对应的微观分子或原子运动的统计平均值。就这样，热力学以及统计力学先后在经典力学的基础上形成了。

光学也是如此。牛顿本人一开始就试图把他的力学观念用于光学，他假定光是由惯性微粒组成的，以此解释已知的光学现象。虽然牛顿以后的两

百年间一直交织着微粒说和波动说的斗争，但是在牛顿运动定律应用到连续分布的媒质以后，甚至连光的波动论也不得不求助于这些定律。十九世纪初，逐步发展起来的波动光学体系已初具规模，其中以托马斯·扬（Thomas young,1773-1829）和菲涅耳（Augustin Jean Fresnel, 1788-1827）的著作为代表。他们两人都把以太看作是传播光振动的实体。菲涅耳弄清楚光是横波，因此光以太必须具有传播横波媒质那样的弹性，从力学角度讨论这种弹性体的振动，必然能够用数学方法推导出光学定律。尽管以太在性质上还有不甚明确之处，但是它作为光现象的媒质，在相当长一段时间内并未引起根本的异议。

电磁现象的早期研究是在“电流体”和“磁流体”两种力学模型的前提下进行的。电磁学从真正进入定量研究的第一天起就打上了力学的印记。库仑(Charles Auguste de Coulomb, 1736-1806)1785年所做的著名的扭秤实验，虽然确定了电荷之间作用力与距离平方的反比关系，但他对自己的主张并未提出足够的证据，因为当时还没有电荷的量度，库仑定律本身就是对万有引力定律的类比。后来，法拉第（Michael Faraday, 1791-1867）、麦

克斯韦、赫兹（Heinrich Hertz，1857-1894）在电磁学的发展史上谱写了动人的三部曲。1831年，法拉第发现了电磁感应定律，并首次把“场”这一崭新的概念引入物理学。1864年，麦克斯韦把法拉第等人的研究成果概括为一组优美的偏微分方程式，并由此预言存在着电磁波，其传播速度等于光速，而光不过是波长在某一狭小范围内的电磁波。1887年，赫兹用实验证实了电磁波，弄清楚电磁波和光波一样，也具有波动性。已经十分习惯于力学模型的物理学家同样乞灵于臆想出的媒质电磁以太，认为它与光以太一样，弥漫于整个空间，电磁波正是通过以太的振动传播的。

1.4 “未来的物理学真理将不得不在小数点后第六位去寻找”

力学描述了大至恒星（质量为10^{32}-10^{33}克）小至超显微粒子（质量为10^{-18}克）的运动过程，并与一切经验相一致；事实上，它甚至部分地证明了我们关于分子、原子、甚至更小的基本粒子的实验。力学又成为声学、热学、光学、电磁学赖以存在的基础。诚如德国物理学家劳厄（Max von Laue，

1879-1960）所说，当时经典力学和经典物理学已“结合成一座具有庄严雄伟的建筑体系和动人心弦的美丽的庙堂”。物理学家莫不对此顶礼膜拜，他们踌躇满志，以为宇宙秘扃，无不尽辟，后人只需墨守成规，稍加修补。至于发现新事物，创造新原理，前人已不留余蕴，根本无须为此劳心竭力。

著名的美国物理学家迈克耳孙（Albert Abraham Michelson，1852-1931）就持有类似的观点。1888年，在美国科学促进协会克里夫兰会议上，作为物理组副主席的迈克耳孙谈到他的专业光学时说：“无论如何，可以肯定，光学比较重要的事实和定律，以及光学应用比较有名的途径，现在已经瞭如指掌了，光学未来研究和发展的动因已经荡然无存了。”六年后，即1894年，他在芝加哥大学赖尔逊实验室的献辞中重申了上述观点。这时，他把范围从光学扩大到整个物理学。迈克耳孙这样讲道：“虽然任何时候也不能担保，物理学的未来不会隐藏比过去更使人惊讶的奇迹，但是似乎十分可能，绝大多数重要的基本原理已经牢固地确立起来了，下一步的发展看来主要在于把这些原理认真地应用到我们所注意的种种现象中去。正是在这里，测量科学显示了它的重要性——定量的结果比定性

的工作更为重要。一位杰出的物理学家指出：未来的物理学真理将不得不在小数点后第六位去寻找。”据迈克耳孙年轻的同事密立根（Robert Andrews Millikan,1868-1953）回忆，迈克耳孙所说的“杰出的物理学家”指的是开耳芬勋爵(Lord Kelvin，即William Thomson〔威廉·汤姆孙〕,1824-1907)。

迈克耳孙的观点是颇有代表性的。的确，盲目乐观情绪一度在物理学家中间蔓延开来。在这里，列举两位著名的物理学家的轶事也许是耐人寻味的。1932年，德国物理学会在柏林举行宴会，庆祝普朗克（Max Planck，1858-1947）从事科学活动五十周年。普朗克在答辞中回顾了自己的科学生涯，他从事科学活动是从慕尼黑大学开始的。当时，他向自己的老师约里（Philipp von Jolly，1809-1884）表示，他决心献身于理论物理学。约里回答说，“年轻人，你为什么要断送自己的前途呢？要知道，理论物理学已经终结。微分方程已经确立，它们的解法已经制定，可供计算的只是个别的局部情况。可是，把自己的一生献给这一事业，值得吗？”1894年，正读研究生的密立根也受到过类似的劝告。据密立根回忆，当时与他住在一起的三位从事社会学和政治学研究的同学经常和他开玩笑说，社

会科学这一新颖的、“活生生的”领域正在敞开着大门，密立根这个傻瓜却钻在物理学这样一门“没有搞头的”、而且“已经僵死了的”学科之中。

物理学的现有理论已经完美无缺了，物理学的发展前景已经暗淡无光了。往后的研究只能是追求较高的精确性和下一个小数位；可用的方法无非是单调而机械地提供科学数据。在十九世纪后期，许多物理学家的看法就是如此。

物理学向何处去？

第二章

不识庐山真面目
只缘身在此山中

2.1 牛顿的历史局限性

物理学难道真的走到尽头了吗？回答当然是否定的。“科学从认识的较低阶段上升到较高阶段，愈升愈高，但是永远不能通过所谓绝对真理的发现而达到这样一点，在这一点上它再也不能前进一步，除了袖手一旁惊愕地望着这个已经获得的绝对真理出神，就再也无事可做了”。（《马克思恩格斯选集》第四卷，人民出版社，1972年第一版，第212页）物理学也是如此。物理学从来不具有一种对一切时代

都是完美无缺的形式；因为它的内容的有限性总是和可能观察到的事物的无限丰富多样性相对立。这两者的对立统一，永远是物理学发展的持续动力。

创造历史的人们总是不可避免地要受到历史的制约，牛顿当然也不例外。牛顿在他所处的时代“不仅作为某些关键性方法的发明者来说是杰出的，而且他在善于运用他那时的经验材料上也是独特的，同时他还对于数学和物理学的详细证明方法有惊人的创造才能”（爱因斯坦语）。但是，由于受到时代的局限，牛顿在否定亚里士多德以来有关错误论述和含糊概念、创立牛顿力学的同时，也在其中隐含了自我否定的潜在因素。诚如恩格斯所说，“凡在人类历史领域中是现实的，随着时间的推移，都会成为不合理的，因而按其本性来说已经是不合理的，一开始就包含着不合理性”。（《马克思恩格斯选集》第四卷，人民出版社，1972年第一版，第212页）

牛顿虽说是理性时代的先驱者之一，但他的科学工作并未抹掉神学的印记。特别是在1712年为《原理》补写的“总释”中，他把至高无上的上帝描绘成浑身是眼，浑身是耳，浑身是脑，浑身是臂，并有全能进行感觉、理解和活动。上帝不仅是自然界的主宰者，而且也是力学理论的担保者。撇开其

神学印记不谈，牛顿所提出的一些基本概念和基本原理也存在着固有的局限性。尽管牛顿的解决是天才的，而且在他那个时代也是必然的，“是一位具有最高思维能力和创造力的人所能发现的唯一的道路”（爱因斯坦语）。牛顿甚至比以后几代的物理学家更了解他的力学著述中所隐含的基本困难，只是由于牛顿尽力把他的体系表现为由经验必然性所决定的，特别是由于经典力学在实践上的巨大成就，足以阻碍后人去思考那些基本概念和基本原理的先验特征；以致于在相当长的时期内，无论谁也没有想到，整个物理学的基础可能需要从根本上加以改造。

经典力学基本概念和基本原理的固有局限性主要表现在以下几个方面。第一，尽管牛顿一再声明“我不做假设”，但他还是引入了超越经验的绝对时间、绝对空间等基本概念。按照牛顿的说法，绝对的、真正的和数学的时间自身在流逝着，而且由于其本性而在均匀地、与任何其他外界事物无关地流逝着。绝对空间，就其本性而言，是与任何外界事物无关而永远是相同的和不动的。绝对运动是一个物体从某一绝对的处所向另一绝对的处所的移动，牛顿以著名的旋转水桶实验证明绝对运动的存

在。第二，牛顿虽然对引力的本质持审慎态度，但最终还是对它作了抽象的、纯粹数学形式的概括，把它实际看作是一种直接的、即时传递的超距作用力。经典力学的定律和公式都是机械决定论的。第三，在经典力学中物体的质量是恒定不变的，它与物体的速度或能量无关。第四，经典力学定律只适用于宏观低速世界，对于可与光速相比的高速情况和微观世界的适用问题，当时没有涉及也不可能涉及。这些固有的局限性，就是后来引起物理学危机与革命的内在根据。相对论、量子论就是在克服上述局限性的过程中逐步发展起来的。

2.2 经典物理学与经典力学的潜在矛盾

经典物理学是物理学家自觉运用经典力学的基本概念和基本原理建立起来的理论体系。但是，与物理学家的主观愿望相反，经典物理学的深入发展反过来却削弱了经典力学的基础，暴露出经典力学的某些局限性。

在经典物理学中，最难使人满意之处恐怕莫过于对光的描述了。如果微粒说是正确的，人们不禁要问：当光被吸收的时候，组成光的粒子变成了什

么呢？而且为了既表示可称量物质（Ponderable matter，亦译有重物质或有质物质）又表示光，必须在讨论中引入不同的实体，这无论如何也不能使人心安理得。同样，纳入力学框架中的光的波动论也难以自圆其说。按照波动论，光被解释为充满宇宙空间的以太的振动。由于光是横波，因此以太必须具有承受切应力而不承受压应力的能力，又由于以太对可称量物质并不产生可观察到的阻力，它又必须具有极小的密度。为此，人们绞尽脑汁，臆想出种种以太模型。托马斯·扬把以太比作穿过树丛的清风；科希（Augustin Louis Cauchy，1789-1857）提议以太具有负压缩性；麦卡拉（James Macu Culagh，1809-1847）认为以太是与已知弹性体根本不同的新型弹性物质；斯托克斯（George Gabriel Stokes，1819-1903）却把以太喻为沥青和果子冻；开耳芬则异想天开，视以太犹如不含空气的均匀泡沫，粘在固体上久久不破。这种众说纷纭、莫衷一是的以太实在叫人难以捉摸，它必然象幽灵一样和普通物质并存着。这样一来，经典力学和光学就失去了结构上的统一。为了寻求这种统一，洛奇（Oliver Joseph Lodge，1851-1940）1882年宣称，以太是“一种充满空间的连续实体，它能够象

光那样振动，它能够分裂为正电和负电，它能够以漩涡的形式构成物质，它能够连续地无冲撞地传播”，并自诩这是以太的“现代观点”。这种无所不能、无奇不有的以太反倒使人如堕五里雾中。

经典力学的基本概念和基本原理在热力学中也遇到了一些麻烦。1865年，克劳修斯确立了热力学第二定律，该定律揭示出与热现象有关的物理过程具有不可逆性。在经典力学中，从来也未发现类似的情况，力学过程的可逆性是由普遍的力学原理做保证的。可是热力学第二定律也是普遍成立的，因此，这个矛盾是无法用力学的基本观念予以解释的。玻耳兹曼注意到这一难题，他洞察到趋于平衡分布的问题是解决可逆性之谜的关键。1872年他提出了H定理，并且证明了H函数随时间的变化总是负值或零，而且变为零时只能趋于平衡状态下的麦克斯韦分布，熵增大正是由于H减小的缘故。但是在1876年，洛施密特（Joseph Loschmidt, 1821-1895）对此提出诘难，他认为微观运动是可逆的，与麦克斯韦分布不同的分布也是稳定的。为了克服微观可逆性与宏观不可逆性的对立，玻耳兹曼在1877年的论文中对H定理作了统计解释。他认为：“不管开始时粒子的位置和速度如何，经过很长时

间，分布总会趋于平衡，这是无法证明的。但是人们却可以证明，经过某一长时间后，导致平衡分布的初始条件的数目比不能导致平衡分布的数目要大得不可比拟。”玻耳兹曼的结论是：H定理是统计性的，它减少的几率最大，当然H也有增加的可能性，只是几率非常小而已，以致于实际上无法实现，所以宏观过程总是不可逆的。玻耳兹曼虽然依据经典力学摆脱了上述麻烦，但与此同时却产生了另一个矛盾，即热力学的统计性质与经典力学机械决定论的矛盾。

经典力学所受到的最大冲击来自电磁理论。在牛顿的影响下，超距作用的假设迅速传播到物理学的其他领域。由于人们能够从超距作用推导出数学上简单、优美的势理论，确实也有助于这种传播；而接触作用则仅仅用于变形体力学。因此，电磁现象的早期理论也是超距作用理论。直到十九世纪下半叶，在法拉第和麦克斯韦的影响下，情况才有所变化。按照他们的电磁理论，电磁作用并不是即时传递的超距作用，而是通过电磁场（或以太）以有限速度传播的非超距作用。爱因斯坦和英费尔德后来曾这样揭示两种理论体系之间的对立：电磁场定律“不象牛顿定律那样联系两个相隔很远的事件，

它们不是把此处所发生的事情跟彼处的条件联系起来。此处的与现在的场只与最邻近的以及刚过去的场发生关系。假如我们知道此处和现在所发生的事件，这些方程便可以帮助我们预测在空间上稍微远一些，在时间上稍微迟一些会发生什么。它们能使我们用一些小步骤来增加场的知识。把这些小步骤加起来，我们便可以由远处所发生的事件推出此处所发生的事件。牛顿的理论恰恰相反，它只允许把距离很远的事件联系起来的大步骤。”另外，经典力学中运动着的质点是能量的唯一载体，具有能量并且可用空间坐标的连续函数来描述的场同质点一样，也是一种不能再简化的物理实在。这样，在经典力学和经典电磁学两种理论体系之间就存在着超距作用与媒递作用、间断的质点与连续的场的尖锐对立。

2.3 不识庐山真面目，只缘身在此山中

我们在上面对经典力学的基本概念和基本原理的局限性以及经典物理学与经典力学的潜在矛盾进行了逻辑分析（不是历史描述）。诚然，经典物理学的形成和确立是经典力学基本概念和基本原理推

广的丰硕成果，但是随着时间的推移，这两种理论体系之间的裂痕也日益显露出来。事实上，这种状况比我们分析的还要广泛，还要深刻。但是，当时的物理学家十分迷恋经典力学，囿于机械自然观而不能自拔。他们看不到上述矛盾，至少是没有意识到矛盾的尖锐性。他们以循规蹈矩为至善，以改弦更张为异端，只是习惯地对经典力学修修补补，硬把那些带有革命性的新发现和新思想纳入旧有的理论框架之中。甚至连在统计力学和电动力学领域作出杰出贡献的麦克斯韦也不例外。尽管可以把麦克斯韦视为动摇了以力学作为物理学最终基础这一信念的人，可是他却在其自觉的思考中紧抱着机械自然观不放，把热、光、电现象统统归结为以太的力学作用。1884年，威廉·汤姆孙好象发表机械观宣言一样说："我的目标就是要证明，如何建造一个力学模型，这个模型在我们所思考的无论什么物理现象中，都将满足所要求的条件。在我没有给一种事物建立起一个力学模型之前，我是永远也不会满足的。如果我能够成功地建立起一个模型，我就能理解它，否则我就不能理解。"威廉·汤姆孙为了用以太这一力学模型解释光、电、磁现象，竟然在1890年别出心裁地提出，电效应是由以太的平动引起的，磁现象

是由以太的转动引起的，而光却是由以太波动式的振动引起的。J·J·汤姆孙(Joseph John Thomson，1856-1940)1888年的言论大体代表了一代物理学家的思想，他说：经典物理学五十年间所完成的主要进展，其“最引人注目的一个结果就是增强了用力学原理来说明一切物理现象的信念，促进了追求这种说明的研究。”他进而断言：“一切物理现象都能够从力学的角度来说明，这是一条公理，整个物理学就建造在这条公理之上。”玻耳兹曼1886年5月29日在皇家科学院的讲演中断然宣称：“如果你要问我，我们的世纪是钢铁世纪、蒸汽世纪，还是电气世纪，那么我会毫不犹豫地回答，我们的世纪是机械自然观的世纪，……”

不仅机械自然观广为流行，而且力学先验论也风靡一时。在十九世纪八十年代前后，经典力学的基本概念和基本原理在物理学家当中造成一种权威性，并被人为地打上了“思维的必然性”、“先验地给予”等等烙印，使人们忘记了它们的世俗来源，而把它们当作某种一成不变的东西。他们想，每一种自然现象必须用力学来解释，这不是偶然的、讲究实际的，而是合乎逻辑的、必然的。按照他们的观点，力学原理不仅仅是以经验为根据的、真实

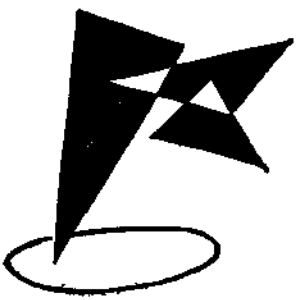
的定律，而且象几何学上的公理和定理一样，也是先验的或必然的真理。

在相当长的一段历史时间内，人们对牛顿及其力学的崇拜也达到迷信的程度。牛顿于1727年去世时，人们这样褒扬他：自然及自然之定律统统隐藏在暗夜之中，上帝说，"让牛顿干吧！"于是一切便大放光明。拉格朗日也对牛顿大唱赞歌：只有一个宇宙，而且恰巧历史上也只有一个人是这个宇宙规律的解释者。正如前面已讲过的，这种迷信一直蔓延到十九世纪末，以致不少物理学家都持有维多利亚式的态度——经典力学与经典物理学已经完美无缺了，所有值得知道的东西都已经知道了。

"不识庐山真面目，只缘身在此山中"。要使物理学家意识到经典力学基本概念和基本原理的局限性，下决心变革经典力学的基础，就必须使他们挣脱力学先验论和机械自然观的束缚，破除对经典力学的迷信。一个新的思想启蒙势在必行，恩斯特·马赫（Ernst Mach，1838-1916）正巧在这种特定的历史条件下扮演了启蒙者的角色。

第三章

把经典力学的基本概念从奥林帕斯山上拉下来



3.1 历史背景

正是在这样的历史环境下，当动摇经典理论基础的新实验和新发现还未大量涌现时，当物理学家还沉浸在盲目乐观的情绪之中时，马赫就看出了经典力学理论框架的局限性。他于1883年出版了他的历史性著作《力学及其发展的批判历史概论》(以下简称《力学》)，对经典力学进行了全面的、深入的批判。

其实，从十七世纪末起，一些自然科学家和哲学

家就批判了牛顿的绝对空间概念，其中最著名的是莱布尼兹（Gottfried wilhelm Freiherr von Leibniz，1646-1716）和贝克莱（George Berkeley，1685-1753）。他们已很有可能——尽管绝不是完全可能——表明绝对位置和绝对运动在牛顿体系中根本没有作用；他们又确实从值得重视的美学要求方面成功地暗示出，一种关于空间和运动的彻底相对性概念以后必将出现。但是，他们的批评是纯逻辑和纯哲学的，他们做梦也想不到向相对论体系过渡竟然会得到可观测的效应。由于他们的睿智超越了整整一个时代，他们没有，也不可能把他们的观点同牛顿理论用于自然界所引起的任何问题联系起来。特别是由于人们对牛顿权威的崇拜和对经典力学的迷信，这些批判当然不可能激起多大的共鸣。其结果，他们的观点在十八世纪头几十年中就随着他们本人的去世而销声匿迹了。

到十九世纪初期，对牛顿力学中的力、质量、惯性、作用与反作用等重要概念的批判性的分析就已经开始陆续进行了。这种具有代表性的评论不仅涉及到这些概念的形而上学性（它们不是来自经验，而是从哲学引出），而且也指出这些概念过于拟人化的特点（它们过多地从主体出发，因而被认为不

能充分地描述自然界）。卡诺（Sadi Carnot，1796-1832）就曾经提到，力的概念具有“神秘的和形而上学的性质”。他认为，象力这样的“不可靠的本质”，“实体论的性质”，应当逐渐从科学中排除出去。基尔霍夫（Gustav Robert Kirchhoff，1824-1887）力图避免在力学中运用拟人性的概念，他纯粹用分析方法解释力的定义，为此他仅仅利用空间、时间和质量的概念。但是，这些批判都比较零散和肤浅，尤其是这些批判都是在不触犯流行的机械观的前提下进行的，因而不可能产生革命性的结果。正是马赫的《力学》，客观上完成了这项历史使命。

3.2 马赫小传

马赫1838年2月18日生于摩拉维亚地区布尔诺附近的切尔利斯-图拉斯，在奥匈帝国几乎度过他的整个一生。他的父亲受过高等教育，后来在一个贵族家里做家庭教师；他的母亲爱好音乐、绘画和诗歌，生性快活，举止文雅。马赫的双亲为马赫提供了一个自由的环境，培育了他的不受约束的、批判的、顽强的科学好奇心和怀疑主义。

童年的马赫对外界事物具有极为强烈的好奇

心，直到晚年，他还清晰地记得他儿时的一些趣事。他记得他两岁时如何在草地上拼命地奔跑，追逐正在落山的太阳。他记得他四、五岁时登上高耸的城墙时，惊讶地看到城下的人变得那么小。特别是磨房风车在风力的推动下不停地转动，给马赫幼小的心灵留下了永不磨灭的印象。马赫后来在研究康德（Immanuel Kant，1724-1804）的因果概念时，常常回忆起这些童年的经验。他写道："这个印象把我的幼稚的思想从信仰奇迹的暧昧阶段提高到因果观念的水平。从此，我不再把我不理解的事物看作背后有什么神秘物存在了。"

九岁时，马赫被送到一所僧侣主办的学校学习。学校的教师认为他"没有天赋"，父亲只好把他带回家。直到十四岁，马赫基本上都是在家里接受父亲教育的，并利用一些时间干庄稼活和木工活。十五岁那年，天真活泼的马赫进入了公立中学上高年级。他对那些没完没了的宗教训练十分反感，他特别尊敬博物学教师，津津有味地听老师讲拉马克的进化论和康德-拉普拉斯的宇宙演化论。父亲的丰富藏书给马赫以源源不断的精神力量，年轻的马赫如饥似渴地读完了康德的《未来形而上学导论》，从中受到极大的启发，这种启发也引导他对力学进行历史的

批判的研究。

在维也纳大学经过五年数学、物理和哲学的学习之后，1860年马赫以放电和感应的论文考取了博士学位，这使得他后来成为一个训练有素的物理学家。然而，他一生的大部分时间却是忙于生理学、心理学以及科学史、科学哲学等问题的研究。事实证明，马赫是一位敏锐的、富于想象力的科学理论批判家。

3.3 马赫在《力学及其发展的批判历史概论》中对经典力学的批判

马赫是从1870年开始研究科学史的。有足够的证据表明，马赫精通拉丁文、希腊文、法文、意大利文和英文。马赫在研究中审查了这些文种的第一手原始资料，此外他也非常熟悉第二手文献。从马赫的私人信件可以看到，他与国际学术团体进行着思想交流，加之他在1883年之前就多次作过批判经典力学的尝试(事实上，马赫在1862年就作了一个题为"历史发展中的力学原理和机械论者的物理学"的讲演，这可以说是《力学》一书的胚芽。1872年，马赫在一年前讲演的基础上完成了《能量守恒定律的

历史和根源》一书。该书批判了力学先验论，并通过对历史的考察得出了否定机械自然观的结论，《力学》中的一些基本观点在该书中都有所涉及），这一切都有助于他完成《力学》这一在物理学领域中划时代的著作——《力学》的出版也许可以说是标志着《原理》绝对统治时代的终结。

按照马赫的见解，一个伟大的科学家必须象牛顿那样具备两大特点：从世界的经验中把握本质要素的想象力和理智的概括能力。在《力学》中，马赫详细介绍了经典力学的基本观点，充分肯定了牛顿及其后继者的历史功绩，盛赞了《原理》表述的明晰性，同时提出有力的证据，以改造经典力学的基本概念和基本原理。尽管马赫注意用真正的科学精神进行讨论，但是《力学》的字里行间还是颤动着一种难以压抑住的激昂基调，并不时流露出论战的狂热。马赫以怀疑的经验论哲学为武器，揭示出经典力学基本概念和基本原理的先验本质。马赫在《力学》德文初版的前言中公开申明，这本书的"倾向是相当富有启发性的，或者还可以讲得更清楚些，是反形而上学的。"结束力学的优越地位，并进而给机械观以沉重打击，也是马赫的本意。

《力学》共分为五章，它们分别是："静力学

原理的发展”、“动力学原理的发展”、“力学原理的推广运用和力学的演绎发展”、“力学的形式发展”、“力学和其他知识范围的关系”。在《力学》中，马赫想要通过对科学根源作批判性的、历史上的和心理学上的研讨来揭露形而上学的暧昧性、因袭下来的拟人说以及模棱两可的看法，并且论证对科学进行呆板解释方面的人为性。马赫试图说明这样一些问题：我们对力学的科学内容有些什么疑问，我们是如何得到这些内容的，我们是从何处导出它们的，它们能在什么程度上为我们牢固地占有。马赫具体地考察了一些力学原理的“证明”。他指出，在所有这些“证明”的背后，都隐含着某种人为的先入之见。马赫认为，在牛顿力学中，应该把基于经验的部分与任意约定的部分区别开来，目前的力学形式是由历史的偶然性决定的。马赫力图使人们相信，自然的性质不能借助于所谓不证自明的假设来捏造，而只应该从经验中引出。他断言：“一个超出认识范围的东西，一个不能被感觉到的东西，在自然科学中是没有意义的。”

对经验论哲学充满自信的马赫力图用统统消灭假设的方法来清洗经典力学的基本概念和基本原理。马赫不喜欢牛顿的质量概念（“物质的量”），

“因为这种描述本身并不具备必要的明晰性。即使我们象许多作者所做的那样，追溯到假设性的原子也是如此。我们这样做，只能使那些站不住脚的概念复杂化。”正由于“我们不能把明晰的概念与‘物质的量’联系起来”，因此这种概念无助于质量的实际测量。他认为牛顿的质量定义（体积与密度之积）是一个“伪定义”（pseudo-definition），而“质量的真正定义只能从物体的力学关系中推导出来”。为了使“应用具体化”，他基于作用与反作用原理提出：“物体由于相互作用，只要彼此产生大小相等、方向相反的加速度，那么这些物体的质量就相等。”他进而指出“质量比就是对应加速度的负反比”，即$m_1/m_2 = -a_2/a_1$，以此作为相对质量的定义。这样一来，不仅不同的物体能够用相同的标准来量度，而且也使牛顿的作用与反作用原理成为多余的东西，这样便支持了他的思维经济原理。

在使质量成为可测量的量以后，马赫接着以此为基础把力定义为质量与加速度之积，即$m \cdot a$。这样，质量和力都变为可观察物体的可观测特性，从而“消除了所有的形而上学的朦胧”。在这里，马赫对质量和力的处理引进了一种方法，这种方法后来被

加以提炼，并被应用于以操作主义命名的布里奇曼（Percy William Bridgman，1882-1962）的物理学哲学。

马赫反对把惯性看作是物体固有的性质，而把它看作是物体与宇宙之间动力联系所规定的本质。他断言："把惯性看作是自明的，或者企图从'因果持续'这个一般原则推出惯性，无论如何是完全错误的。"按照马赫的主张，在一个虚空宇宙中的物体是没有惯性的。一个系统的惯性可以归结为在这一系统和静止宇宙之间的函数关系，包括相互作用的物质系统的最远部分，谈论孤立物体的惯性毫无意义。

《力学》中最有名的一节就是对牛顿绝对时空观的批判，这一节的一些段落是精萃的，格外引人入胜。马赫批判道："我们不应该忘记，世界上的一切事物都是互相联系、互相依赖的，并且我们本身和我们所有的思想也是自然界的一部分。"同样，时间不言而喻也是不能独立自存的。"时间是一种抽象"，"利用和通过事物的相互联系，我们达到我们的时间观念，这些观念是我们描述事物的最深刻最普遍的观念。"然而，绝对时间无法根据比较运动来量度，无法与经验观测相联系，因此"它既无实践价值，也无科学价值，没有一个人提出证据

说他知道关于绝对时间的任何东西，绝对时间是一种无用的形而上学概念。"根据同样的理由，马赫建议取消绝对空间和绝对运动的概念。他认为，从这两个概念不能演绎出可观察的事物，因为它们是"纯粹的思维产物，纯粹的理智构造，它们不能产生于经验之中"，所以只不过是一种"干巴巴的概念"而已。如果我们以事实为立足点，我们就不难发现，我们知道的仅仅是相对空间和相对运动。因此马赫强调指出："回到绝对空间是大可不必的，因为参照系如同在其他任何情况中一样，都是被相对地确定的。"马赫指出："牛顿旋转水桶的实验只是告诉我们，水对桶壁的相对转动并不引起显著的离心力，而这离心力是由水对地球的质量和其他天体的相对转动所产生的。如果桶壁愈来愈厚，愈来愈重，最后达到好几里厚时，那时就没有人能说这实验会得出什么样的结果"。马赫断言："正如我们已经详细证明的，我们的所有力学原理都是关于相对位置和相对运动的知识。"

马赫对牛顿在《原理》中的宣言（即有关的定义和定律）也进行了系统的批判。例如，针对牛顿的三大运动定律，马赫批判道：我们容易发现，第一和第二定律包括在前面所说的力的定义之中。根据

力的定义，没有力也就没有加速度，结果物体就只能处于静止或做匀速直线运动。而且，在把加速度作为力的量度之后，再又去说运动的变化正比于力，这完全是不必要的同义反复。可以充分地说，作为前提的定义并不是任意的数学定义，而要符合实验给出的物体的特性。第三定律显然包含着某种新的东西。但是，我们已经看到，没有正确的质量概念，它就难以被理解，而正确的质量概念只能够从力学实验中得到，这又使得第三定律变得毫无必要。

马赫在对经典力学进行批判的时候，其矛头直指力学先验论，马赫指出："我们思考的最重要的结果就是，即使表面上看起来最简单的力学定律，实际上也具有十分复杂的特征，这些定律停留在未完成的，甚至永远也不会终止的经验上，……决不应该把它们看作数学上确定了的真理，而宁可看作不仅能够被经验永恒支配，而且也需要由经验来永恒支配的定理。"在马赫看来，尽管力学原理从历史的观点来讲是明白易懂的，它的缺陷也是可以谅解的，并且在一个时期内具有重大的价值，"但是总的说来，它却是一种人为的概念"。"即使它们现在在一些领域内被认为是有效的，但是它们不会，也从来没有不预先经过实践检验就被接受。没

有一个人敢担保能把这些原理推广到经验界限之外。事实上，这样的推广是毫无意义的，……”。马赫觉得，要了解力学原理，实际上只能凭人们在科学探索中所积累的经验。诚如爱因斯坦所说，马赫依据经验论的哲学，把那些“从经验的领域里——在那里，它们是受我们支配的——排除出去，而放到虚无缥渺的先验的顶峰上去”的基本观念，一个一个地“从先验的奥林帕斯山*上拉下来”，揭露出“它们的世俗血统”，“把这些观念从强加给它们的禁忌中解放出来”。

在“力学和其他知识范围的关系”一章中，马赫比较集中地批判了机械自然观。在马赫看来，现在人们从前人那里学到了一种成见，错误地把真实世界看作是一个机械大厦，认为一旦弄清了它的构造，那么便会无所不知，无所不晓。诚然，所有的自然现象都与力学过程有关，而且力学也出现得较早，人们便不得不用已经通晓的力学原理来解释未知的现象。但是，马赫强调指出，纯粹的力学现象是不存在的，它总是与其他现象伴随着，“纯粹的力学现象只是我们为了便于理解事物有意或出于需

* 奥林帕斯山(Olympus)在希腊东北部，是古希腊神话中众神所居的天堂。

要而作出的抽象”。例如，相互加速度的产生看来纯粹是力学现象。但是热、磁、电、化学现象总是与动力学结果相联系，并且当后者被确定时，前者总要局部地加以修正。马赫认为，严格地说来，每一个事物都属于物理学的所有分支，它们只是因为人为的分类而被分开，这部分是出于人们的习惯，部分是出于生理学上的方便和历史上的方便。但是，“在历史上早先获得的知识没有必要成为后来陆续获得的知识的基础。当越来越多的事实被发现、被分类后，适用于普遍领域的全新观念就能够形成。”马赫举例说，在力学中得到的能量守恒定律，尽管可以应用于其他物理学领域，这似乎可以看作是力学作为所有自然作用的基础的表现。“然而，在这种表现中，除了力学现象和其他各类现象之间量的不变关系外，就再也没有包含什么东西了。”马赫进而指出，不恰当地扩大一些结论的适用范围，通过力学而把它们引入物理学，并且以此为先决条件，这实在是一个错误。马赫断言，力学并不具有凌驾于其他学科之上的特权，机械观是毫无道理的，“把力学当作物理学其余分支的基础，以及所有物理现象都要用力学观念来解释的看法是一种偏见。”在同时代的物理学家当中，象马赫这样旗帜鲜明地向

机械自然观宣战的人，恐怕是绝无仅有的。

马赫在《力学》中多次强调，对过去时代的伟大物理学家的评价不应妨碍历史学家讨论他们的主要局限性。其实，马赫本人在批判经典力学的过程中也出现了一些错误和混乱，这既与他的哲学立场有关，也与他的科学思想有关。众所周知，十九世纪后半叶，机械论的科学观受到科学发展的冲击而逐渐走向衰落，马赫是最早洞察到这种倾向的人之一。为了挽救科学世界观的危机，使科学的世界图象不致随机械论图象一起走下坡路，他强调经验论，反对力学先验论和机械自然观。为了给各门学科谋求一个统一的基础，他选取了一条纯粹经验主义的路线，力图从科学中排除一切不能由经验证实的所谓"形而上学"的命题。这种哲学立场和科学观尽管在当时起到了积极的作用，但是终究不能适应科学发展的需要。马赫的致命错误在于，他在抛弃机械唯物主义的同时也抛弃了整个的唯物主义。另外，马赫在批判经典力学的过程中也存在着一些逻辑混乱。尽管如此，《力学》仍不失为"真正伟大的著作之一，并且是科学历史著作的典范"（爱因斯坦语）。

3.4 马赫是在敲着敞开的大门吗？

马赫对经典力学的批判，对于削弱当时占统治地位的力学先验论和机械自然观，认清经典力学基础的虚构性质无疑起了积极作用。它有助于破除迷信，解放思想，为新发现和新理论的提出创造了一种必不可少的自由气氛。事实上，物理学在每一个历史时期都有它自己的基本概念和基本原理，而继后的时期人们又往往夸大它们的作用，不适当地把它们误用到其所能及的范围之外。为了消除这种误用，每一个历史时期都需要一种新的启蒙。正是这种永不止息的启蒙精神，才使科学不致变为僵化的教条。有人认为，马赫恰恰是在特定的历史时期扮演了这种启蒙者的角色，这是不无道理的。

显而易见，马赫对经典力学的批判绝不是穷极无聊的游戏，也不是在敲着敞开的大门。实际情况是，在十九世纪四十年代，由马克思和恩格斯所创立的辩证唯物主义并没有在物理学家中间得到传播。在此之前，虽说在黑格尔的著作中已经有了广博的辩证法纲要，但科学家对黑格尔派"自然哲学"式的态度根本不感兴趣，甚至觉得格外讨厌。更为重要的

是，这些辩证的思想并没有与具体的物理学问题结合起来。事实上，在马赫之前和马赫的同时代，虽则也有一些人偶尔提出类似的观点，但是从来没有一个人把这些观念讲得象他那样透彻，并且有那样宽广的门路；也从来没有一个人象他那样把这些观念可靠地落实到科学的土壤里，落实到物理学里。

由于当时的物理学家不会辩证地思考问题，就这样，诚如爱因斯坦所说，直到世纪之交，那些受传统思想束缚的物理学家依然把经典力学的基本概念和基本原理珍藏在“绝对的东西”，“先验的东西”的“珠宝箱”内，宣称它们是天经地义、神圣不可侵犯的宝物。当具有创新精神的物理学家出于“这门科学发展的需要，要用一个更加严格的概念来代替一个习用的概念时”，这些人“就会发出严厉的抗议，并且抱怨说，这是对最神圣遗产的革命的威胁”。甚至在狭义相对论出现后多年，一些物理学家还死死抱住牛顿的绝对时空概念不放。在这样的历史条件下，怎么能说马赫的批判是穷极无聊的游戏或敲着敞开的大门呢？事实上，当时物理学通向新领域的大门还关闭得严严实实，并没有被辩证唯物主义所打开。在这种背景下，马赫分析了那些流行已久的概念，指明它们的正确性和适用性

所依据的条件，指明它们是怎样从经验所给予的东西中一一产生出来的。这样一来，它们的过大权威性就会被戳穿。如果它们不能被证明为充分合法，它们就将被抛弃；如果它们同所给定的东西之间的对应过于松懈，它们就将被修改；如果能建立一个新的、由于无论那种理由都被认为是优越的体系，那么这些概念就会被别的概念所代替。马赫对经典力学的系统批判，使这扇大门松动了一些，这并不是马赫的不幸，恰恰是他的功绩。要说不幸，其实正是那些力学先验论者和机械论者，他们不仅不去敲这扇紧闭着的大门，而且还重重设防，极力阻止别人去敲。诚然，“如果理论自然科学家愿意从历史地存在的形态中仔细研究辩证哲学，那末这一过程就可以大大地缩短。”然而，历史的发展往往不象人们设想的那样顺利和简单，“历史有它自己的步伐，不管它的进程归根到底是多么辩证的，辩证法往往还是要等待历史很久。”（恩格斯：《自然辩证法》，人民出版社，1971年第一版，第30、92页）

3.5 物理学革命行将到来的先声

马赫的《力学》在当时产生了较大的影响。该

书用德文总共出了九版(马赫在世时出了七版)，并且在1912年之前已被陆续译为英文、法文、意大利文和俄文，后来又有日文等译本问世，几乎传遍了整个世界。可是，正如马赫1912年在德文第七版的序言中所说："四十年前，当我第一次阐述在这本书中所解释的思想时，它们只能得到很少的同情，事实上常常遭到反驳。只有几个朋友……对这些思想极感兴趣。"但是到1883年，情况已有所变化。《力学》第一版受到人们善意的欢迎，在不到五年的时间内，一批印数很大的《力学》书就被抢购一空，并为德语国家的科学界所重视。

在世纪之交，马赫对经典力学的批判和在《力学》中所表达的科学哲学思想在物理学家中间产生了较为深远的影响，导致了对经典物理学的科学与哲学基础的生气勃勃的讨论。情况正如爱因斯坦所说的："马赫曾以其历史的批判的著作，对我们这一代自然科学家起过巨大的影响，在这些著作中，他以深切的感情注意各门科学的成长，追踪这些领域中起开创作用的研究工作者，一直到他们的内心深处。我甚至相信，那些自命为马赫反对派的人，可以说几乎不知道他们曾经如同吮吸他们母亲的乳汁那样吸取了马赫的多少思考方式。"爱因斯坦这

样说不是毫无缘由的，马赫的批判思想从十九世纪八十年代起确实已经广泛地变为当时智力武器的一部分。

马赫的《力学》对爱因斯坦创立相对论产生了引人注目的影响。在他的一位大学生朋友贝索（M.Besso）的建议下，爱因斯坦1897年第一次读到《力学》，在从1902年3月开始的"奥林比亚科学院"时期，他和他年轻时代的朋友哈比希特（C.Habicht）和索洛文（M.Solovine）又学习和讨论了这一著作。在世纪之交这个追寻科学原理基础的英雄时代，马赫坚不可摧的怀疑态度和独立性，对于力学先验论和机械自然观的系统批判以及对经典力学基础的深邃洞察无一不给爱因斯坦以激励和启迪。与爱因斯坦交往甚密的物理学家和科学哲学家P.弗兰克（Philipp Franck，1884-1966）认为："在狭义相对论中，同时性的定义就是基于马赫的下述要求：物理学中的每一个表述必须说出可观测量之间的关系。当爱因斯坦探求在什么样的条件下能使旋转的液体球面变成平面而创立引力理论时，也提出了同样的要求。……马赫的这一要求是一个实证主义的要求，它对爱因斯坦有重大的启发价值。"美国著名科学史家霍耳顿（G.J.Holton）指出，在

相对论中，马赫影响的成分显著地表现在两个方面：其一是，爱因斯坦在他的相对论论文一开始就坚持，基本的物理学问题在做出认识论的分析之前是不能够理解清楚的，尤其是关于空间和时间概念的意义。其二是，爱因斯坦确定了与我们感觉有关的实在，即“事件”，而没有把实在放到超越于感觉经验的地方。

尽管爱因斯坦并没有完全接受类似于上述的观点，尽管他后来对马赫的狭隘经验论持明确的反对态度，但是他并没有忘记马赫对他的积极影响。爱因斯坦先后多次指出，马赫为相对论的发展“铺平了道路”。十九世纪“所有的物理学家，都把古典力学看作是全部物理学的、甚至是全部自然科学的牢固的和最终的基础”，“是恩斯特·马赫，在他的《力学》中冲击了这种教条式的信念；当我是一个学生的时候，这本书正是在这方面给了我深刻的影响。”在创立狭义相对论的过程中，他由于阅读了休谟（David Hume, 1711-1776）和马赫的著作而获得了批判性的思想，一举把时间的绝对性和同时性的绝对性从潜意识中排除出去，从而取得了决定性的进展。在创立广义相对论的过程中，马赫对于惯性本质的理解也使爱因斯坦深受启发。爱因斯坦在1918年“关于广

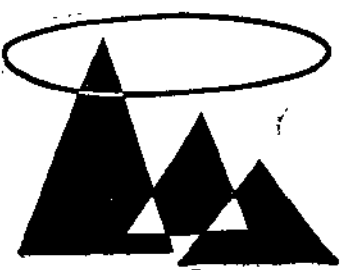
义相对论的原理"的论文中特意提出了"马赫原理"，以强调马赫的主张。这就是，一个孤立物体的惯性是没有意义的；惯性必须归结为物体的相互作用；惯性结构是由宇宙中质量的分布决定的；一个物体的惯性力是这个物体同远距离物质的相互作用。其实早在1913年6月25日，爱因斯坦在致马赫的信中就写道，如果在日食时能观测到星光被太阳的引力场弯曲，"那么您的有关力学基础的天才研究——不顾普朗克不公正的批判——将获得光辉的证实。因为一个必然的结果是，完全按照您对牛顿水桶实验的批判的含义，惯性来源于相互作用"。虽然马赫至死都厌恶相对论，但是爱因斯坦还是实事求是地称他为"相对论的先驱"。

马赫——这位从孔德实证主义到逻辑实证主义的中途人物——在《力学》和其他著作中所阐述的科学哲学思想也直接或间接地影响了一批量子物理学家，特别是哥本哈根学派的一些主要成员。玻尔(Niels Bohr, 1885-1962) 的科学思想中不乏马赫思想的成分。玻恩 (Max Born, 1882-1970) 认为实证主义在科学中是一股生气勃勃的力量，它促成了相对论和量子论的建立。海森伯 (Werner Heisenberg, 1901-1976)指出，马赫的思想途径无疑促进

了从普朗克发现以来的物理学的发展。约尔丹(Pascual Jordan, 1902-) 是一个极端的马赫主义者，公开声称他是马赫的信徒。泡利 (Wolfgang Pauli, 1900-1958) 深受马赫的影响，因为马赫是他的法定教父，他的父亲也是一位马赫的狂热追随者和积极支持者。与哥本哈根学派学术思想不相同的薛定谔(Erwin Schrödinger, 1887-1961) 也采纳了马赫的科学方法论。甚至连马赫的无情反对者普朗克也曾说过"马赫实证主义"的某种"功绩"。当然，马赫批判经典力学所依据的哲学有致命的弱点，特别是他没有认识到科学思想中本质上具有构造的和思辨的性质，因而不能完全适应相对论和量子论发展的需要。因此，普朗克和爱因斯坦等人先后背离了马赫实证主义哲学，并对马赫进行了中肯的批评。但是，在世纪之交物理学革命的前夕和初期，马赫的批判性思想无疑对物理学的革命性变革起了启蒙作用和推动作用。从这种意义上讲，马赫在《力学》中对经典力学的批判可以说是物理学革命行将到来的先声。

第四章

山雨欲来风满楼



物理学理论的正确与否，归根结底必须用实验来检验。理性的批判固然有助于动摇经典力学的基础，但要最终摧毁它，还需要一系列的实验事实。大量为旧理论所无法解释的实验事实，即所谓“反常现象”的涌现，才能导致旧理论的危机，促成新理论的诞生。

4.1 以太之谜和迈克耳孙-莫雷实验

从十九世纪初光的波动说复活以来，物理学家

一直对传光媒质以太议论不休，其中一个重要问题就是以太和可称量物质（特别是地球）的关系问题。当时，有两种针锋相对的观点。菲涅耳在1818年认为，地球是由极为多孔的物质组成的，以太在其中运动几乎不受什么阻碍。地球表面的空气由于其折射率近于1，因而不能或者只能极其微弱地曳引以太，可以把地球表面的以太看作是静止的。斯托克斯认为菲涅耳的理论建立在一切物体对以太都是透明的基础之上，因而是不能容许的。他于1845年提出，在地球表面，以太与地球有相同的速度，即地球完全曳引以太。只有在离开地球表面某一高度的地方，才可以认为以太是静止的。由于菲涅耳的静止以太说能圆满地解释光行差现象（由于地球公转，恒星的表观位置在一年内会发生变化），因而人们普遍赞同它。

假使静止以太说是正确的，那么由于地球公转速度是每秒三十公里，在地球表面理应存在“以太流”。多年来，人们做了一系列的光学和电学实验（即所谓的“以太漂移”实验），企图度量地球通过以太的相对运动。但是，由于实验精度的限制，只能度量地球公转速度和光速之比的一阶量（$v/c \approx 10^{-4}$），这些一阶实验一律给出否定的结果。随

着麦克斯韦电磁理论的发展，人们了解到，与$(v/c)^2$有关的效应应该在光学和电学实验中检测到。因为麦克斯韦理论隐含着，光、电现象有一个优越的参照系，这就是以太在其中静止的参照系，以太漂移的二阶效应理应存在。但是这个实验精度要求太高（达到10^{-8}），一时还难以实现。

其实，麦克斯韦早在1867年就指出，在地球上做测量光速的实验，因为光在同一路径往返，地球运动对以太的影响仅仅表现在二阶效应上。1879年，麦克斯韦在致美国航海历书事务所的信中就提出了度量太阳系相对以太运动速度的计划，当时在事务所工作的迈克耳孙采纳了这一建议。1881年，迈克耳孙正在德国柏林亥姆霍兹手下留学。由于在柏林无法完成实验，迈克耳孙把别人为他建造的整个装置运到波茨坦天体物理观测站进行实验。所期望的位移是干涉条纹的0.1，实际测得的位移仅仅是0.004－0.005，这只不过相当于实验的误差而已。显然，否定结果（也称“零结果”）表明，企图检测的以太流是不存在的。迈克耳孙面对事实不得不认为：“静止以太的假设被证明是不正确的，并且可以得到一个必然的结论：该假设是错误的。”“这个结论与迄今被普遍接受的光行差现象的解释直接矛

盾”，“他不能不与斯托克斯1846年在《哲学杂志》发表的论文附加摘要相一致”。但是，这次实验的精度还不够高，数据计算也有错误。1881年冬，巴黎的波蒂埃（M.A.Potier）指出了计算中的错误（估计的效果比实际大了两倍），洛伦兹（Hendrik Antoon Lorentz，1853-1928）在1884年也指出了这些问题。因此，无论迈克耳孙还是其他人，都没有把这次实验看作是决定性的。迈克耳孙本人此后也转移了精密测定光速值的兴趣，对1881年的实验进行改良的工作就这样搁置下去了。

1884年秋，威廉·汤姆孙访问美国，他在巴尔的摩作了多次讲演。到会听讲的迈克耳孙有机会会见了与汤姆孙一起访美的瑞利勋爵（Lord Rayleigh，即J. W. Strutt，1842-1919），他们就1881年的实验交换了意见。与此同时，瑞利也转达了洛伦兹的意见。瑞利的劝告给迈克耳孙以极大的勇气，他进一步改进了干涉仪，和著名的化学教授莫雷（Edward Williams Morley，1838-1923）一起，于1887年7月在克利夫兰重新进行了实验，此时迈克耳孙已是克利夫兰城凯思应用科学院的教授了。为了维持稳定，减小振动的影响，他们把干涉仪安装在很重的石板上，并使石板悬浮在水银液面上，

可以平稳地绕中心支轴转动。为了尽可能增大光路，尽管干涉仪的臂长已达11米，他们还在石板上安装了多个反射镜，使钠光束来回往返八次。根据计算，干涉条纹的移动量应为0.37，但实测值还达不到0.01。迈克耳孙和莫雷认为，如果地球和以太之间有相对运动，相对速度可能小于地球公转速度的1/60，肯定小于1/40。他们在实验报告中说："似乎有理由确信，即使在地球和以太之间存在着相对运动，它必定是很小的；小到足以完全驳倒菲涅耳的光行差解释。"

1887年实验的否定结果对于当时的每一个人来说都是极为迷惑不解的，而且在很长一段时间内依然如故，人们并没有认为该实验是判决性的。就连迈克耳孙自己对他的结果也大失所望，他称自己的实验是一次"失败"，以致放弃了在实验报告中许下的诺言（每五天进行六小时测量，连续重复三个月，以便消除所有的不确定性），不愿再进行长期的观察，而把干涉仪用来干其他事去了。迈克耳孙并不认为自己的实验结果有什么重要意义，他觉得实验之所以有意义，是因为设计了一个灵敏的干涉仪，并以此自我安慰。直到晚年，他还亲自对爱因斯坦说，他自己的实验引起了相对论这样一个"怪

物”，他实在是有点懊悔的。洛伦兹对迈克耳孙实验的结果也感到郁郁不乐，他在1892年写给瑞利的信中说：“我现在不知道怎样才能摆脱这个矛盾，不过我仍然相信，如果我们不得不抛弃菲涅耳的理论，……我们就根本不会有一个合适的理论了。”洛伦兹对1887年的实验结果依然疑虑重重：“在迈克耳孙先生的实验中，迄今还会有一些仍被看漏的地方吗？”瑞利在1892年发表的一篇论文中认为，“地球表面的以太是绝对的静止呢，还是相对的静止呢”，这个问题依然悬而未决。他觉得迈克耳孙得到的否定结果是“一个真正令人扫兴的事情”，并敦促迈克耳孙再做一次实验。威廉·汤姆孙直到本世纪开头还不甘心实验的否定结果。

顺便说说，迈克耳孙的实验工作和爱因斯坦的相对论在历史上并无什么直接联系。但是在1900年前后，他的“以太漂移”实验对洛伦兹等人的电子论却产生了毋庸置疑的影响。尽管学术界对该实验的历史作用仍有不同的看法，但迈克耳孙本人晚年仍念念不忘“可爱的以太”。直到1927年，他在自己最后一本书中谈到相对论已被人们承认时，仍然对新理论疑虑重重。

迈克耳孙-莫雷实验似乎排除了菲涅耳的静止

以太说，而静止以太说不仅为电磁理论所要求，而且也受到光行差现象和斐索（Armand Fizeau，1819-1896）实验的支持。为了摆脱这个恼人的困境，斐兹杰拉德(George Fitzgerald 1851-1901)和洛伦兹分别在1889年和1892年各自独立地提出了所谓的“收缩假设”。他们认为，由于干涉仪的臂在运动方向上缩短了10^{-8}倍的线度，这样便补偿了地球通过静止以太时所引起的干涉条纹的位移，从而得到了否定的结果。洛伦兹基于电子论进而认为，这种收缩是真实的动力学效应，对于物质来说具有普遍意义。拉摩（Joseph Larmor，1857-1942）也十分赞同这一看法，他证明如果物质由电子组成，这种情况便能够发生。

4.2 经典能量均分定理面临困境

反常现象接踵而来。经典的能量均分定理也与气体比热的实验结果发生了尖锐的冲突。1857年，克劳修斯把分子的速度看作是一定的，得出了分子动能与绝对温度成正比的结论，他检查了定压热容量Cp与定容热容量Cv的比值γ后指出，必须考虑分子的自由度。麦克斯韦认为，气体分子具有各种各样

的速度，他从概率的角度处理了这个问题。他把气体分子看作刚性球，并在1859年证明：处于热平衡状态下的气体，所有分子的每个自由度平均分配 $\frac{1}{2}kT$ 的能量，其中k是玻耳兹曼常数，T是绝对温度。玻耳兹曼后来又把平均动能相等的定理推广到任何无限大数目的粒子系中去。因此，该定理也被称为麦克斯韦-玻耳兹曼能量均分定理。

能量均分定理能够解释许多现象，对于常温下的固体和单原子气体的比热，它也给出了较为满意的结果。但是对于双原子和多原子气体，实测的γ值（$\gamma = Cp/Cv$）显著地大于理论计算值，这从下面的表格可以明显看出。

面对这种差异，连统计力学创始人之一的吉布斯（Joseph Willard Gibbs，1839-1903）也不得不承认："众所周知，理论要求双原子气体每个分子具有六个自由度，在我们的比热实验中，我们发现自由度不能多于五个。的确，人们正在一个不牢靠的基础上进行建设。"其实，麦克斯韦和玻耳兹曼也注意到他们的学说与实验事实的不可调和的矛盾。玻耳兹曼建议用分子和周围以太的相互作用来加以解释，但是麦克斯韦却指出，这条道根本走不通，它只会带来更多的麻烦。在十九世纪最后十

气 体	γ-1的值	
	按照麦克斯韦-玻耳兹曼能量均分定理的计算值	实 测 值
空 气	2/7 = 0.2857	0.406
H_2	〃	0.40
O_2	〃	0.41
Cl_2	〃	0.32
CO	〃	0.39
NO	〃	0.39
CO_2	1/8 = 0.1667	0.30
N_2O	〃	0.331
NH_3	1/9 = 0.1111	0.311

年，威廉·汤姆孙、瑞利、金斯（James Hopwood Jeans，1877-1946）、彭加勒（Jules Henri Poincaré，1854-1912）等人都对这个课题进行过细致的分析。瑞利一直是麦克斯韦-玻耳兹曼学说的坚定支持者，他在1900年发表的短文“动能均分定律”中指出，人们面临的基本困难“不仅仅与气体运动论有关，确切地讲，而且也涉及到一般动力学”，它破坏了根据能量均分定律进行“计算的简单性”。但是，瑞利这位经典观念的维护者却坚持

认为："似乎所希望的东西就是避免破坏关于能量均分这一普遍结论的简单性。"

4.3 物理学上空的"两朵乌云"

在历史跨入新世纪的日子里，英国科学界声名显赫的元老开耳芬勋爵于1900年4月27日在皇家学会发表了一篇著名的讲演。开耳芬勋爵本名威廉·汤姆孙，是英国杰出的理论和实验物理学家，二十二岁就当上了格拉斯哥大学的自然哲学教授。他在电磁学和热学研究方面取得了显著成就，一生共发表了约七百篇科学论文。从1858年起，他领导完成了横越大西洋、连结欧美两大洲的海底电缆敷设工程。他还为大不列颠建立了第一所物理实验室。由于卓著的成就和出色的贡献，他于1851年就被选为伦敦皇家学会会员，1890年到1895年担任皇家学会会长，1892年被封为开耳芬勋爵。

开耳芬后来以新世纪初的这次讲演为基础写了一篇文章，补充了从1900年初到文章完成之日（1901年2月2日）为止的十三个月的工作，扩展了在讲演中阐述的问题。他的秘书安德森（W.Anderson）帮他绘制了各种精确的几何图形，进行了许多代数

和算术运算，核对了大量的个别结果。开耳芬的文章以“悬浮在热和光动力理论上空的十九世纪的乌云”为题，刊登在1901年7月出版的《哲学杂志》和《科学杂志》合刊上。

文章一开始，开耳芬就开门见山地写道：“动力学理论断言热和光都是运动的方式，可是现在，这种理论的优美性和明晰性被两朵乌云遮蔽得黯然失色了。第一朵乌云是随着光的波动论而开始出现的，菲涅耳和托马斯·扬研究过这个理论；它包括这样一个问题：地球如何通过本质上是光以太这样的弹性固体而运动呢？第二朵乌云是麦克斯韦-玻耳兹曼关于能量均分的学说。”

关于第一朵乌云，即“以太和可称量物体的相对运动”，开耳芬回顾并分析了物理学家对这个问题的看法。他认为，如果我们有一个令人满意的基本的以太和物质的关系，以代替旧的使人为难的观念——当物质原子相对于它们周围的以太运动时，原于就要排除它们前面空间中的以太——那么就可以使所有现象更快地得到充分解释。开耳芬十分赞同菲涅耳的观点，他不同意托马斯·扬的下述看法：以太在物体分子和原于间通过，犹如清风吹过树丛一样，并不是完全自由的。按照菲涅耳的静

止以太说，如果忽略地球自转和整个太阳系的运动，那么在平行于地球公转轨道的切线上理应存在每秒三十公里的以太流。“但是，哎呀！与该结论相抵触的事发生了，地球大气中的以太相对于地球并不运动”，迈克耳孙和莫雷精心完成的实验证明了这一点。“该实验的结果可以保证是可靠的”，“无论在实验的设想方面或实施方面，我无法看出任何缺陷”。然而，斐兹杰拉德和伦洛兹各自独立地作出的“出色建议”似乎已经摆脱了面临的困境，使得“实验结果不能驳倒以太通过地球所占空间是自由运动着”的结论。尽管开耳芬倾向静止以太说并赞同收缩假说，但是他好象还是理智地认为，这个问题依然悬而未决。他在这里对此持谨慎态度：“恐怕我们还必须把第一朵乌云看作是很浓密的。”

开耳芬用大部分篇幅详细讨论了“第二朵乌云”。他简单地回顾了能量均分学说产生的过程，分析了该学说的内容和遇到的困难，他特别列表（前表）指出双原子或多原子气体比热的理论计算值和实际观测值的偏离。开耳芬断言：“与观察的明显偏离绝对足以否证玻耳兹曼-麦克斯韦学说”，“事实上，玻耳兹曼-麦克斯韦学说的偏差比我们列举的还

要大”，“实际不存在玻耳兹曼-麦克斯韦学说与气体比热真实情况相符的可能性。”他在文章中极力强调两个大胆的结论：就玻耳兹曼-麦克斯韦学说而言，使人颇为不满的是：数学定论没有证明，实验定论也不可靠。与瑞利企图维护玻耳兹曼-麦克斯韦学说的做法针锋相对，开耳芬明确提出：“达到所期望的结果的最简单途径就是否认这一结论”。他信心十足地预言，第二朵“在十九世纪最后四分之一时期内遮蔽了热和光分子论亮光的乌云，人们在二十世纪初就可以使其消失。”

在物理学史上，开耳芬勋爵素以保守著称，但是他的这次讲演却深中肯綮，他不仅洞察到十九世纪物理学面临的两个难题，而且还指出了较为明智的努力方向。这固然与他的天才的直觉能力有关，恐怕也不能无视世纪之交物理学革命洪流的冲击。

4.4 山雨欲来风满楼

然而，开耳芬毕竟把物理学的天空看得过于晴朗了。其实，当时物理学的天空何止“两朵乌云”！早在开耳芬演讲之前，就已经是“黑云压城城欲摧”，“山雨欲来风满楼”了！物理学早就陷入严

重的危机之中，物理学革命的急风暴雨在一些领域已经降临了。事实上，在十九世纪末，黑体辐射、光电效应、原子光谱等实验事实也接二连三地和经典力学和经典物理学的理论发生了尖锐的对立。实际情况比我们所述的还要广泛，还要深刻。

物理学革命可以说是从1895年揭开序幕的。特别是由于放射性的发现和研究，有力地冲击了原子不可分、质量不可变的传统物质观念，动摇了经典力学和经典物理学的基础。新发现一个接一个地写入物理学的编年史，就连那些坚持旧观点的人，也无法反对大量确凿的实验证据，至多只能抱一种走着瞧的态度。

1895年11月 8 日到12月28日，德国物理学家伦琴（Wilhelm-Konrad Röntgen, 1845-1923）在研究阴极射线时发现了具有惊人贯穿能力的X射线。

1896年，法国物理学家贝克勒耳（Henri Becquerel, 1852-1908）发现铀元素具有放射性。

1897年，英国的J.J.汤姆孙和荷兰的塞曼（Pieter Zeeman, 1865-1943）分别测定了阴极射线的荷质比，确证电子的存在。

1898年，居里夫妇（皮埃尔·居里，Piérre

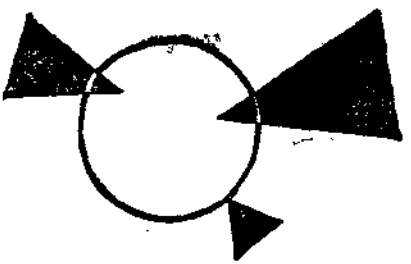
Curie, 1859—1906；玛丽·居里-斯克罗多夫斯卡，Marie Curie-Sklodowska, 1867-1934）又发现了放射性极强的新元素钋和镭。

1899年，卢瑟福（Ernest Rutherford, 1871-1937）把注意力转向辐射本性的研究，他和索迪（Frederick Soddy, 1877-1956）于1902年提出了元素嬗变说。居里又于1903年测定了镭的热效应。

X射线的发现和放射性的研究摇撼了十九世纪的一些传统科学观念，引起了极大的轰动。当时各种报纸和科学杂志都充满着报道这方面内容的大字标题。彭加勒曾把镭誉为“当代伟大的革命家”。克鲁克斯中肯地评论道：“十分之几克镭就破坏了化学中的原子论，革新了物理学的基础，复活了炼金术士的观念，给某些趾高气扬的化学家以沉重的打击。”密立根的激动心情也可以从他1904年初写的两篇通俗文章中略见一斑：“古代炼金术家的梦想是真的，对放射性元素来说，全部都缓慢而自发地嬗变为别的元素。”

第五章

危机是革命的前夜



世纪之交，一系列接踵而至的新发现不仅动摇了整个物理学的基础，而且也震撼了两百多年来在物理学领域占统治地位的机械观，于是导致了所谓的物理学危机。

危机是科学发展进程中的一个重要阶段，旧理论的基础业已摇摇欲坠，新理论的基础尚未确立或巩固之时就是科学的危机时期。危机是科学革命的前夜，是新理论诞生的前奏，它能加速旧理论框架的变革和新理论框架的建立。只有清醒认识到危机和产生危机的根源，才有可能毅然决然地抛弃旧理论

框架，自觉地寻求新理论框架，并以此为基础重建新的理论体系。相反，看不到危机的根源和危机的严重性，就难以感觉到变革旧理论框架的必要性和紧迫性，至多只能在旧理论的框架内修修补补，甚至还会把别人所发现的触及旧理论基础的新现象、所提出的革命性的新概念和新理论当作异端邪说加以反对。世纪之交，是物理学基础急剧变革的时期，是物理学危机与革命交织着的时期。当时，物理学家是怎样看待物理学危机的呢？

5.1 彭加勒论物理学危机

当时的大多数物理学家都没有觉察到物理学危机，至少是没有意识到危机的严重性。他们依然坚信经典力学的理论框架是整个理论物理学大厦赖以建立的基础，是所有其它科学分支赖以产生的根源。谁也没有想过，整个物理学的基础可能需要从根本上加以改造。因而，他们看不清物理学发展的形势，找不到摆脱危机的出路，只是企图在旧理论的框架内进行修补。

与几乎所有的老一辈的物理学家不同，法国著名科学家朱尔·昂利·彭加勒在物理学新实验与旧

理论尖锐冲突的时期，敏锐地觉察到物理学的危机。他在二十世纪开头几年先后写了三本书（《科学与假说》，1902年；《科学的价值》，1905年；《科学与方法》，1908年），都或多或少地谈到这个问题。特别是在《科学的价值》中，他更为明确、系统、全面地论述了物理学危机。

彭加勒这样写道，数学物理学“有着严重危机的迹象”，“不仅能量守恒定律成了问题，而且所有其他的原理也同样遭到危险，正如它们相继受到审查时我们将要看到的那样。”在“数学物理学当前的危机”一章中，彭加勒列举并分析了新的实验事实与经典物理学五个基本原理的矛盾。他指出，卡诺原理，或能的退降原理告诉我们，运动能因摩擦而转化为热，热却不能全部转化为运动。但是，古伊（L. George Gouy，1854-1926）通过深入研究布朗运动发现，微粒愈小，运动愈活泼，并且该运动不依赖于外部能源而能永无休止地进行下去。在布朗运动中，运动因摩擦而转化为热，反之，热也能毫无损失地转化为运动。“这与卡诺原理相反”，该原理“已眼看着处于危险之中”。相对性原理虽然受到电磁理论的冲击，但它“已为日常经验所证实”，并且“以一种不可抗拒的方式印进人

们健全的感觉中，而现在却受到了非难。”因为迈克耳孙实验虽然支持相对性原理，但是洛伦兹为了调和该原理与电动力学的矛盾，提出的当地时间和长度收缩等辅助假设也难以解释其他实验事实。按照电子论，两个电子之间的作用只能以有限的速率传播，不可能同时进行，因此牛顿原理，或作用与反作用原理也遇到了“同样的困难”。由于亚伯拉罕（Max Abraham, 1875-1922）的计算和考夫曼（Walther Kaufmann, 1871-1947）的实验，拉瓦锡（A. L. Lavoisier）原理，或质量守恒原理也“失去其正确性”。考夫曼的实验结果“如果确定，就会产生全新的力学”。迈尔（Julius Robert von Mayer, 1814-1878）原理，或能量守恒原理也与镭源源不断地放出能量这一事实相违背。拉姆塞（William Ramsay, 1852-1916）力求证明，镭虽然储藏有大量的能，却也不是无穷无尽的。由于镭嬗变的耗尽期需一千二百五十年，因此，尽管迈尔原理“似乎更为牢固”，但在“等待此日到来之时，我们的疑虑依然存在。”

彭加勒的上述分析大体反映了当时物理学所面临的严峻形势，说明物理学的基本原理需要重新受到实验的审查和裁决。固然，用今天的科学观点来

衡量，他的分析不见得完全妥当，而且遣词用语也并非都是十分确切的。但是，彭加勒的论述并不象有人说的那样，“完全是别有用心的歪曲”，“把自然科学革命污蔑为‘危机’”。其原因主要在于，当时的物理学界对这些问题还没有合理的答案。例如，对于镭持续放出热量而质量并未觉察出有什么变化的现象，许多物理学家都迷惑不解，这似乎与能量守恒原理不相容。彭加勒对质量守恒原理的怀疑也出自实验事实。考夫曼在1901年测定镭射气的荷质比时发现，由于射气的速度接近光速，其表观质量比真实质量显著变大。1902年，考夫曼采纳了亚伯拉罕刚性球电子假设，他用实验证明，电子的质量完全是电磁质量，其机械质量为零。更为重要的是，考夫曼得到了电子的质量依赖于速度的证据（考夫曼的计算有错误，1908年有人指出了这一点）。爱因斯坦在1905年写的一篇论文中提出了质能关系式，并且指出“物体的质量是它所含能量的量度”。于是，“质量守恒原理失去了它的独立性，而同能量守恒原理融合在一起了。”但是，彭加勒在写《科学的价值》时，还不知道这些论断，而且这些论断也未立即得到实验证实。这样，彭加勒从已知的事实出发，对这两个原理提出质疑，本

身是十分自然的，根本谈不上“别有用心”和“污蔑”。

正由于彭加勒看到了旧原理的危机，因此他迫切地感到，“物理学有必要重新改造”。但是他告诫人们：“没有必要因此而得出结论说，科学编织的是珀涅罗珀之网*，它只能以短命的结构出现，这种结构不久便不得不被科学自身之手彻底加以拆毁。”彭加勒认为：“乍看起来，理论似乎是脆弱的，而且科学史向我们表明，它们往往如昙花一现。但是，每一种理论也不能完全消灭，总要保留下某种东西，我们必须设法加以清理。因为正是在那里，才有着真正的实在。”彭加勒反复强调下述观点：科学是有继承性的，新原理的出现并未全盘否定旧原理，旧原理不仅有其历史价值，而且在有效适用范围内还有其实用价值。彭加勒写道：“科学的进步似乎使得过去牢固建立起来的、甚至被视为基本的原理处于危险之中。可是，没有什么证据表明它们是

---

* 珀涅罗珀之网(a penelope's web)。在希腊神话中，珀涅罗珀是奥德修斯（Odysseus）忠贞的妻子。奥德修斯外出二十年未归。珀涅罗珀相信他一定会回来。在这一期间，为了谢绝求婚者，她推辞说要给奥德修斯的父亲织寿服（珀涅罗珀之网），待织成之后，才能作出改嫁的决定。为了拖延时间，她白天忙着织网，晚上又把白天织成的东西拆掉。

不可挽救的，即使它们不能原封不动地存在，但也能够经过修正而继续有效。”由于科学日新月异地发展，其面目已经大为改观，“以致于一般人已无法辨认了，但是在行家看来，总是能够追寻到数世纪之前工作的踪迹。”彭加勒断言：“旧原理为新原理之祖，旧原理的发现者并非劳而无功。”“在今日的科学之中，我们还能够看到父辈们所描绘出的梗概的一般特性。”正因为旧原理“还是有用的”。所以彭加勒指出：“应该有必要为它们保留一席之地。假若要完全排除它们，就会使我们失去宝贵的武器。”彭加勒还强调指出：“物理学的基本原理具有极高的价值，这是人们在许多物理规律的陈述中寻求共同点时才得到的；因此，它们似乎代表着无数观察的精髓。”因此，说彭加勒“否认、怀疑物理学旧原理的客观价值”，显然是没有根据的。

长期以来，流行着这样一种看法：彭加勒提出物理学危机，就意味着他断言“科学本身崩溃了。科学原理崩溃了”，“自然科学家坚信不移的全部真理也毁灭了”。实际情况正好相反，彭加勒在论述了五个基本原理所遇到的困难和危险后指出：“我们不应后悔我们相信了这些原理”，“在

实践中，最可靠的途径还是继续相信这些原理。”彭加勒还认为，六个基本原理(外加最小作用原理)“都是大胆推广实验的结果；但是它们看起来好象是从真正的普遍性得到了高度的可靠性。事实上，原理愈普遍，受检验的机会就愈频繁。受检验的次数愈增加，检验的形式愈多样，它们就会成为毋庸置疑的真理。”彭加勒还针锋相对地批判了“科学破产”的错误观点。他这样写道：“外行人看到科学理论并非一贯正确而惊恐万状。在经过一些年代的繁荣兴旺之后，他们看到这些理论一个接一个地被抛弃了，他们看到残垣颓壁，层层废墟。他们预见，今天风靡一时的理论不久将不得不走向它们的反面，因此他们断言，这些理论是绝对无用的。这一切就是他们所谓的科学破产。”彭加勒接着一针见血地指出：“他们的这种怀疑是肤浅的，他们全然没有考虑到科学理论的目的和作用。要不然他们就会明白，这些废墟也许还有某些用处。”

彭加勒也不象有人所想象的那样，在“哀叹”物理学危机的到来。事实上，彭加勒认为，物理学危机并非凶兆，而是吉兆，它表明物理学变革的时机已经成熟。这种看法在当时实在是十分难能可贵的。为了消除人们不必要的忧虑，彭加勒指出，物

理学危机预示着“一种行将到来的变革”。他劝告大家，尽管危机是严重的，“然而不必太担心。我们确信，病人*不会因此而死亡，我们甚至可以期望，这场危机将会有益于健康，因为过去的历史似乎向我们保证了这一点。事实上，这场危机不是第一次”。彭加勒接着在“数学物理学的历史”一章中回顾了物理学所走过的历程。他认为，中心力物理学是数学物理学发展的第一阶段。但是，中心力的概念后来不足以说明新的事实而引起了危机，于是我们不得不舍去旧的见解。这样，物理学便逐步发展到第二阶段，即原理物理学阶段。但是，这样一来，“我们能说第一阶段已经毫无用处了吗？我们能说科学在五十年间误入歧途了吗？我们能说往昔的千辛万苦偶因一念之差，终成千里之谬，于是可以付诸东流吗？”彭加勒断言：“世界上决没有这种事。”他进而反问道：“没有第一阶段，你难道能设想会进入第二阶段吗？”在彭加勒看来，当时原理物理学所面临的危机将导致数学物理学进入第三阶段，他根据历史的经验预言，第三阶段“将是相同的过程”，“因为我们已经渡过了一次同样的危机”。彭加勒形象地比喻说，物理学的这种进化“正如甲

* 彭加勒在这里喻指数学物理学。

虫脱壳一样，撑破了它狭小的外壳，换上了新的表皮，在新的表皮之下，人们能够认出甲虫保留下来的机体的本质特性。”尽管彭加勒关于物理学发展的三个阶段的划分未必确切，但他的一些基本观点却是可取的。有人在批判彭加勒时说：“物理学革命是好事，是正常现象，而危机则是坏事”，“是科学发展的不正常现象，是科学发展的病态，它影响科学的正常发展。”显而易见，这种科学史观远远不及彭加勒的高明。

彭加勒不仅深谙物理学的历史和现状，而且对它的未来也具有惊人的预见能力。在“数学物理学的将来”一章中，彭加勒写道：“也许我们将要建造一个全新的力学，我们已经成功地瞥见到它了。在这个全新的力学内，惯性随速度而增加，光速会变为不可逾越的极限。原来的比较简单的力学依然保持为一级近似，因为它对不太大的速度还是正确的，以致在新力学中还能够发现旧力学。”其实，早在1904年9月的圣路易斯会议上，彭加勒就讲过这些话了。彭加勒面对物理学危机并未忧心忡忡，悲观失望，相反，他对科学的前景是满怀信心的。他说：“原先已知的现象被越来越好地分门别类，但新现象也来要求它们的地位。”我们已经有了“阴

极射线、X射线、铀射线和镭射线。这里有一个完整的世界，是谁也没有料想到的。还不知要有多少不速之客将在这儿寄宿呢！”彭加勒满有把握地断定：“纵使我们的眼界有限，但是并非偶然的、十分诱人的希望依然存在。过去的收获既已不少，可以确信，未来的收获将比过去更多。”

综上所述，彭加勒关于物理学危机的基本观点可以大致概括如下：第一，他敏锐地觉察到由于新实验与旧原理的尖锐冲突，物理学已处于危机之中。第二，他认为物理学危机是好事而不是坏事，危机能加速物理学的根本变革，是物理学进入新阶段的前兆。第三，他指出，要摆脱危机，就要在新实验事实的基础上重新改造物理学。第四，他一再肯定旧理论的固有价值，认为它们在其有效适用范围内还是大有用处的，并且旗帜鲜明地批判了“绝对的怀疑论”、“科学破产”之类的错误观点。第五，他预见到了新力学的大致图景，对科学的前途表示乐观。彭加勒后来在为他的著作的英译本所写的“序言”中进而指出：物理学危机标志着物理学处于“革命的前夜”，处于“一个更为重要的时刻”。他还认为：“力学必须让位于一个较为广泛的概念，这种概念将能解释力学，而力学却不能解释这

种概念。”彭加勒的上述基本观点以及对科学发展规律的有关见解，即使在今天看来也还是正确的。这充分表明，他对世纪之交物理学形势的洞察远远超过当时大多数的物理学家。

5.2 彭加勒简历

彭加勒的成长道路和渊博学识向我们表明，他的敏锐而深刻的思想决非无源之水、无本之木。

彭加勒于1854年4月29日出生在法国南希。他的父亲是一位第一流的生理学家兼医生，母亲是一个善良、机敏、聪颖的女人，她把全部心血都用在她的两个孩子的教育上。彭加勒的堂兄后来曾出任法兰西第三共和国的总理和总统，他的叔父和堂弟也在政府作官。

不幸的是，早在幼年时期，彭加勒运动神经的共济官能就缺乏协调，他的左手和右手一样都能写字，但都写得不好。五岁时，他经受了白喉病的折磨，从此留下了喉头麻痹症。病魔使得他长期身体虚弱、缺乏自信。他无法和其他孩子自由自在地做游戏，只好独自一人钻在书堆里寻求自己的乐趣。

读书使他得到极大的宽慰，也使得他不寻常的天资逐渐显露出来。他读书速度之快令人难以置信，一旦过目便永记不忘，往往还能说出某页某行讲了些什么。除了这种罕见的视觉记忆（也叫空间记忆）外，他的时间记忆能力也很强，他能以不可思议的准确性回忆起久远的往事。

彭加勒的视力极差，这反倒锻炼了他的听觉记忆。大多数数学家通常似乎是靠眼睛记忆定理和公式，而彭加勒几乎全用耳朵。在上学期间，由于看不到黑板，他就以耳代目，博闻强记，从来也没有作过课堂笔记。他的敏锐的空间直觉和丰富的想象力也是这样培养起来的，人们都说他具有“一双内在的眼睛”。

彭加勒很早就对自然历史和经典名著表现出极大的兴趣，大约在十五岁左右，数学象一块磁石一样，紧紧地吸住了他的心灵。一开始，他就显示出终生的怪癖：当他一刻不停地来回踱步时，那是正在专心致志地思考问题，只有在彻底想好后，他才把结果记在纸上。他工作时全神贯注，别人谈话或其他噪音对他没有丝毫影响。

1872年至1875年，二十一岁的彭加勒进入国立高等矿业学校深造。他虽然具有一个真正的工程

师的勇气，但是这个职业与他的志趣不相投，于是他利用一切闲暇时间攻读数学。1879年，他由于微分方程方面的论文获取了博士学位。同年12月1日，他到卡恩大学任数学分析教师。1881年，二十八岁的彭加勒升迁到巴黎大学执教，他一生的其余时间基本上都是在巴黎作为一个法国数学的统治者而度过的。

彭加勒涉猎广泛，才能超群。他主要是一个数学家，在函数论、数论、代数几何学、代数学、微分方程、代数拓扑学等分支都有重要建树。在天文学方面，他以三体问题、旋转流体质量的平衡形状、宇宙演化假设等问题的研究遐迩闻名。彭加勒讲授数学物理学达二十年以上，他以特有的求全性和旺盛的精力完成这项任务，结果使他成为该学科所有分支的第一流专家。他还写了一些颇受欢迎的科学哲学著作和趣味盎然的科普作品。当时，无论在巴黎的公园还是咖啡馆，都能看到工人和店员贪婪地读彭加勒的通俗著作。他的科学哲学名著被陆续译为英、德、俄、西班牙、匈牙利、瑞典、日、中等文字，在世界上广为流传。彭加勒的这些著作充分显示了他的文字才华，他被认为是法国的散文大师，被选为法国文学研究院的成员。

彭加勒仅活了五十八岁，但却发表了将近五百篇论文和三十多本专著。这一切使他成为世界上最有智慧、最有影响的一位人物，也使他赢得了法国政府所能给予的一切荣誉，赢得了其他国家的奖赏。人们称他是“理性科学的活跃智囊”，“本世纪初唯一留下的全才”。

5.3 还彭加勒以历史的本来面目

彭加勒之所以对物理学危机具有基本正确的见解，大致有两方面的原因，其一是他对物理学的历史和现状有清晰的了解，其二在于他的哲学思想有一定的积极因素。

彭加勒通晓物理学的发展史，在《科学的价值》中，他专用一章叙述了“数学物理学的历史”。他的一些结论，就是历史经验的总结。彭加勒对物理学当时的现状也很熟悉。他不仅对经典物理学的发展做出了巨大的贡献，而且也直接参与了物理学革命的三个前沿领域（物质结构、量子论、相对论）的研究。由于他的建议，客观上促成了贝克勒耳于1896年发现了铀射线。是他的启示，推动了洛伦兹1904年理论（经典电子论的完备形式）的提出。早

在1902年，彭加勒就预见到，有可能通过布朗运动验证原子、分子的存在（爱因斯坦到1905年才在一篇论文中定量地研究了这个问题）。特别值得一提的是，彭加勒对相对论的发展作出了重要贡献，他堪称为相对论的先驱。显而易见，他当时无疑处于物理学的前沿，因而对物理学发展形势就有可能看得比较清楚。

彭加勒对物理学危机有基本正确的见解，这也和他的一些富有启发性的哲学思想不无关系。首先，彭加勒坚持“实验是真理的唯一源泉”的观点。他强调指出：“唯有实验能够告诉我们任何新事物，唯有实验能够给予我们可靠性。这两点是毋庸置疑的。”在彭加勒看来，“科学定律不是人为的创造物”，“一切定律莫不来自实验”。即使是“纯粹数学家，如果忘记外部世界的存在，那么他就会象这样一位画家：虽然深知色与形如何配合，但由于缺乏实物模型，其创作能力会很快衰竭。”彭加勒的这种思想不仅讲在口头上，而且也贯穿到他一生的科学活动中。

其次，彭加勒看重经验，但并不象狭隘的经验论者那样排斥理论和理论思维。他明确指出：“经验并非一切，而且学者也不是被动的，他没有等待真理来

找他，或者期待真理碰到他鼻子尖上的机会。他必须去迎接真理，正是他的思考向他展示出通向真理的道路。”彭加勒认为，实验物理学固然很重要，但数学物理学“所起的作用也是用不着怀疑的”。数学物理学“能使物理学家揭示出事物潜在的和谐，使其以新的方式看待这些事物。”他还毫不留情地批评了那些“顽固不化的实际家”。他写道：“最藐视理论的人，他们天天吃理论的食粮而不自知。假若失去这种食粮，进步会立即中止。”在法国，实证主义的影响在世纪之交依然根深蒂固，科学家都不敢提出超出他们直接观察的世界本性的理论。在这种情况下，彭加勒持有这样的看法，并且付诸行动（例如提出宇宙演化的理论），这确实是难能可贵的。

再次，彭加勒旗帜鲜明地反对怀疑一切（即绝对的怀疑论）。他说：“怀疑一切和信仰一切同样都是方便的解答，因为这两者都使我们不加思索。”他毫不含糊地表示：“绝对的怀疑论是不可接受的”。彭加勒还有力地批驳了那些断言旧理论是“绝对无用”的人，批判了他们所持的怀疑论，他指出：“他们的这种怀疑论是肤浅的”。

最后，在彭加勒的哲学思想中，也包含着比较

丰富的辩证法因素。这一点从他对科学发展规律，对物理学危机，对新旧理论之间、实验与理论之间的关系等问题的看法上都能窥见一斑。例如，他在论述迈尔原理（他认为克劳修斯原理也是这样）时说："〔该原理〕具有足够灵活的形式，足以使我们将所希望的一切都放入其中。我并没有说它毫无客观实在性，也没有说它只是一种同义反复，因为在每一种情况下，只要人们不把它推到极端，它就会有十分清楚的意义。它的这种灵活性足以使人们相信它的持久性，并且在另一方面，只有它溶化于更高级的和谐中，它才能消失。我们可以满怀信心地依靠它去工作，并且可以预先确定，我们的工作不会白费。"实际上，这段话已正确地涉及到知识的相对性和绝对性的辩证关系（当然，彭加勒并未意识到这一点）。彭加勒的有关思想确实富有启发性，难怪爱因斯坦称他为"敏锐的深刻的思想家"。

正是在上述唯物主义成分和辩证法因素的引导下，彭加勒面对新实验和旧理论的严重冲突，既不象当时大多数物理学家那样，抱残守缺，削足适履，把经典理论视为神圣不变的教条；也不象一些浅薄之徒那样，怀疑一切，悲观失望，鼓吹"科学破产"。他是在充分肯定旧理论固有价值的前提下，

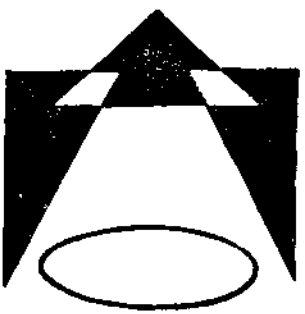
谋求在新实验事实的基础上发展物理学。这样，他在科学领域中也就能够正视现实，而不是不顾一切地固执己见。

特别值得注意的是，彭加勒是一位学识渊博的科学家，他在论证自己的哲学观点时，不仅大量引证了他所精通的数学、物理学、天文学方面的材料，而且也旁及化学、生物学、地质学、生理学、心理学等领域，他掌握的材料之丰富决非纯粹哲学家所能企及；同时，他又是一位有哲学头脑的科学家，他研究、探索的问题，往往超出了一般科学家的视野。由于他具有如此优越的条件，所以在他的有关科学哲学论述中，不时迸发出令人深省的思想火花，其中有些论点，可以当之无愧地列为人类的思想财富。因此，我们在摒弃他的唯心主义哲学前提时，也要注意借鉴和汲取他的一些敏锐的、深刻的思想。

所有这些都表明，彭加勒是富有思想的、正直严肃的科学家。事实上，不管他的同事、学生，还是认为他并非伟人的人都是这样看待他的。彭加勒根本不是一个在科学史上“兴风作浪”的反而人物，在苏联、东欧、日本和我国长期流行的讹传是没有事实根据的。应该抹去彭加勒脸上厚厚的尘埃和油彩，还其以历史的本来面目。

第六章

1895年：物理学革命的序幕



世纪之交，是一个动荡的、令人困惑的年代，也是一个活跃的、激动人心的年代。在这个时代里，正如英国物理学家洛奇当时所说的，物理学“每月、每星期、甚至几乎每天都有进步”，“旧日习谈的问题用理性的眼光来看，都有一种不可预料的魔力和光芒”。“‘结论’这个字眼现在看来是很荒谬的”，因为科学“时刻都在活跃地跳动着”，“都有人把以前有些恍惚不确定的真理更明瞭地发挥出来”。

在这个激动人心的年代里，以1895年伦琴X射

线的发现，1900年普朗克能量子概念的提出和1905年爱因斯坦“论动体的电动力学”论文的发表为开端，物理学革命在三个领域先后展开了。结果，诞生了两大理论体系——相对论和量子力学。

6.1 真空放电和阴极射线

物理学革命的序幕也许可以说是由X射线的发现揭开的。X射线的发现迅速引起了连锁反应，从此以后，纷至沓来的发现，一下子就在机械论的物质观方面打开了一个大缺口，原子不可分、不可变的教条彻底破产了。而X射线的发现却起源于真空放电和阴极射线的研究。

十九世纪中叶，随着电的知识的积累和真空技术的提高，真空放电及电的本性的研究愈来愈引起人们的兴趣。1836年，法拉第重新注意到被人遗忘了很长时间的真空放电现象，他发现低压放电管阴极周围存在着阴暗部分，即所谓的法拉第暗区。他预言，这种放电现象也许会给以后的电学研究带来极大的影响。

真空放电的正式研究是由普吕克尔（Julius Plücker，1801-1868）开始的。他利用经过改进了的盖斯勒管（该管是H. Geissler 1855年制造出来

的）和附属仪器（盖斯勒泵、鲁姆科尔夫放电线圈）在1857年进行了一系列实验。他注意到，从铂阴极发出的粒子飞向玻璃管，粒子流打在管壁上发出萤光，萤光斑能够被磁力偏转。1865年，斯普伦格（H. J. P. Sprengel）制成了水银流注高真空泵，为进一步开展这项研究提供了技术条件。普吕克尔早先的学生希托夫（Johann Wilhelm Hittorf, 1824-1914）在1869年发现，如果把各种形状的固体放在阴极和发萤光的玻璃壁之间，物体的影子就明显地映在管壁上，他由此推断射线是直线传播的。1871年哥耳德斯坦（Eugen Goldstein, 1850-1930）观察到，这种射线与阴极所用材料无关，而且还能引起化学反应。他把普吕克尔发现的这种射线命名为“阴极射线”。

1871年，瓦利（Cromwell Fleetwood Varley, 1828-1883）根据阴极射线能被磁铁偏转的事实推断，阴极射线是由带负电的物质微粒组成的。1879年，克鲁克斯（William Crookes, 1832-1919）亲自改良了真空泵，获得了大气压百万分之一数量级的真空度。他通过实验发现，阴极射线能推动放入管内的云母小风车转动，确认阴极射线是一种粒子流，如果使粒子停止，就产生显著的热量。克鲁

克斯把阴极射线称为“物质的第四态”或“超气态物质”。

瓦利和克鲁克斯的“粒子流说”也遭到了许多人的反对，其中包括象泰特（Peter Guthrie Tait，1831-1901）和赫兹这样的著名人物，他们提出的是“以太振动说”。泰特指出，如果阴极射线是高速运动的粒子，那么这种粒子发出的光就应该显示出多普勒效应。可是在阴极射线的谱线中却看不到这种效应。赫兹也以阴极射线是连续产生的并在电场中不受偏转为理由，极力否认粒子流说。

1892年人们发现一个极有意义的新事实：阴极射线能够穿透薄金属片而发生漫射现象，就象光通过一种混浊介质那样。为此，勒纳得（Philipp Lenard，1862-1947）1894年专门制作了一个带有小窗的新型盖斯勒管，阴极射线可以通过窗口漫射。他研究了从小窗飞出的射线（也称勒纳得射线）的性质，确证了漫射的说法。他注意到，射线的萤光作用取决于距离，而与它们射向物体的方向无关。它们能使空气电离，但穿透空气只有很小的距离（大约不超过2 cm）。它们还能使照相底片感光。勒纳得把射线的散射状态与最短波长的光的行为进行了比较，从而得出结论：它们一定能够描绘成在

分子限度范围内的极为细微的以太运动。但是就在1894年，J.J.汤姆孙利用旋转镜测得阴极射线的速度是1.9×10^7厘米/秒，这与光速相比是太小了，他认为把阴极射线看作是电磁波是毫无道理的。1895年，佩兰(Jean Baptiste Perrin, 1870-1942)利用金属箱收集了阴极射线，箱子显示出带负电，这说明阴极射线运载的是负电荷。

围绕阴极射线的争论和探究，导致了X射线的发现和电子的确证。

6.2 伦琴和他的新射线——X射线

伦琴是1895年11月8日在德国维尔茨堡大学实验室研究勒纳得射线时做出惊人发现的，当时他已是该大学的校长了。伦琴是一位诚实的实验家，他十分刻苦地阅读科学文献，经常亲自动手制作实验设备，对于各种名目繁多的社交活动和公开约会，他总是设法躲避。但是，他从未因不好交际的习惯和勤奋好学的天性而影响学校的行政工作。1894年，当他就任维尔茨堡大学校长时，他明确地表白了自己对职务的态度："大学是从事科学研究和智力教育的园地，是培养师生的理想场所。就这一点而言，

大学的重大意义要比它的实际价值大得多。由于这个原因，就应该尽力挑选有远见卓识的人来填补学校职位的空缺。这些人应该既是出色的教师，又是卓越的科学研究者与开拓者。”

伦琴本人就是一位“有远见卓识的”、“卓越的科学研究者与开拓者”，他很快洞察到自己发现的重大意义，但是他对自己的两个助手和周围的人却只字未提，一心埋头于他的实验研究。在工作最紧张的时候，他就在实验室吃饭和休息。1895年12月28日，他终于完成了题为“关于一种新的放射线”的初步通报，并马上呈交给维尔茨堡市物理学与医学协会主席。该通报在三天之内就发表在《物理学与医学协会会议报告》中。据考证，文章不可能在三天内发表，出版日期大概不是写的准确日期。印刷恐怕是在1895年底进行的，但出版发行却是1896年头几天的事。

在初步通报中，伦琴认为没有必要长篇大论，他只是扼要地叙述了实验结果和一些初步设想。伦琴写道：“在希托夫真空管、高真空的勒纳得管、克鲁克斯管和其他类似的装置中进行鲁姆科尔夫放电时，如果用一张适当的薄黑硬纸紧紧包住放电管，并把整个装置放在一个十分黑暗的房间中，那么每

次放电时都可以观察到，放在该装置附近的涂有铂氰化钡的纸屏发出萤光。这样发生的萤光与涂有铂氰化钡的面与没有涂铂氰化钡的面那一面向着放电装置完全无关。即使纸屏距装置两米远，也能够看到这种萤光。”伦琴注意到，这种射线的显著特征是具有极强的贯穿能力。它不仅能穿透包着放电管的黑纸，而且能穿透约一千页的书籍，数张叠在一起的锡箔，二至三厘米厚的松木板，十五厘米厚的木板，数厘米厚的硬橡胶和玻璃板。更使伦琴感到有趣的是：“如果把手放到放电装置和纸屏之间，那么在微暗的手的阴影中，可以看到较黑的骨骼的影像。”伦琴还发现，X 射线能使照相底片感光，X 射线通过的空气具有使和它接触的带电体发生放电的能力。他特别注意到，X 射线的行为和阴极射线大不相同，这从下面的事实可以看出：不管我们试验多少次，甚至加上非常强的磁场，可是磁场并不能使X 射线偏转。伦琴由此断言：“X 射线和阴极射线不是一种东西，X 射线是由阴极射线引起的，是在放电装置的玻璃管壁上发生的。”X 射线到底是什么呢？由于它与光存在着共同点——产生阴影、萤光和化学作用——它会不会是一种超紫外线呢？或许它是由以太的纵振动（正好与光的横振

动相反）引起的？伦琴提出了这些困惑不解的问题，也许正因为这样，他才给自己发现的神秘射线起了一个奇怪的名子——X射线。

X射线的发现不仅引起了惊讶，而且也引起了轰动。因为在当时的西方世界，一百多个地方都配备有类似的实验装置，可以立即重复和验证伦琴的简单实验；另外X射线在医疗上也具有巨大的实用价值。在美国报纸报道X射线发现的急电后的四十八小时内，至少有六个X射线照相装置在大洋彼岸的实验室建造起来。伦琴的论文单行本在若干星期内印刷了五版，它还被迅速翻译成英文、法文、意大利和俄文。在伦琴发现公布后的头一年(1896年)内，至少制成了三十二种不同型号的伦琴管，西方国家还接纳了一整批专利。而且，以X射线为内容的书籍和小册子出版了不下五十种，论文超过一千篇。在科学史上，一种新发现能引起这样迅速而强烈的反响实属罕见。但是，对于报刊不切实际地大吹大擂，伦琴感到由衷的生厌。他抱怨说："在形形色色的报导中，我的工作被弄得面目全非，连我自己都难以辨认。""我逐渐习惯了这种喧嚣，但风暴的平息是需要时间的，我整整四个星期不能恢复自己的实验。别人可以工作，唯独我不能工作。"

由于X射线的发现，使伦琴成为世界上第一个荣获诺贝尔物理学奖的人（诺贝尔奖金于1901年首次颁发）。可是，伦琴平素沉默寡言，从来没有学会必要的讲话技巧，他甚至谢绝了为热情的听众作一次他们期待的获奖演说。伦琴把金钱看得很淡薄，他拒绝了有关专利权，他把得到的奖金也捐赠给维尔茨堡大学。

X射线的发现标志着一个新时期的开始，伦琴幸运地成为这个新时期的开拓者。其实，早在1876年，克鲁克斯在研究放电管时就发现，放在实验装置附近的一个没有打开的照相底片由于某种说不清的原因变得模糊不清了。他以为底片的质量有问题，还去生产厂退了货。美国费城的古德斯比德（A.W.Goodspeed）在1890年不仅产生出X射线，而且意外地得到了X射线的照片。可是，直到1896年2月22日，他还在一次讲演中把自己发现的射线当作阴极射线。勒纳得也错过了发现X射线的机会。在伦琴公布其发现的前两年，勒纳得就清楚地指出，他得到的射线能产生感光效应，他还得到一个与伦琴几乎完全相同的阴影照片，尽管在放电管的铝小窗和照相底片之间还插入了纸片和铝片。可是，勒纳得同样也没有认识到这一事实的真正意

义。后来，这位成了希特勒帮凶的所谓“德国物理学”首脑极力抹杀伦琴发现X射线的功绩。

显而易见，在当时的历史条件下，即使伦琴未能达到目的，其他人或迟或早地也将会做出这一发现。然而，如果因此而得出结论，说伦琴的发现只是由于交了好运，那可就大错特错了。早在发现X射线之前，伦琴就发表了十七篇论文，他是一位才能出众、一丝不苟的实验家，他把实验看作是撬开自然秘密的强有力的杠杆。而且，他善于思索，能从杂乱的事实和繁琐的数据中找到某种本质的联系。在他的身上，体现了理论家的推断和实验家的技巧的完美统一。这是他取得成功的必然条件。机遇无疑是存在的，但机遇只偏爱那种有准备的头脑。柏林科学院在致伦琴的贺词中说得好：“科学史告诉我们，在每一项科学发现中，功劳和幸运独特地结合在一起；在这种情况下，许多外行人也许认为幸运是主要的因素。但是，了解您的创造个性特点的人将会懂得，正是您，一位摆脱了一切成见的、把完善的实验艺术和最高的科学诚意及注意力结合起来的研究者，应当得到作出这一伟大发现的幸福。”

关于X射线本性的研究，不少人后来在这方面做了大量的工作。这里，只提一下劳厄的贡献。

1912年，劳厄提出X射线通过晶体会出现干涉现象的设想。1913年，他根据干涉现象的实验推断，X射线是频率极高的光波，其波长在0.1Å到1.5Å之间（1 Å = 10^{-8}厘米）。与此同时，他也证明了晶体的原子点阵结构。为此，他于1914年获得了诺贝尔物理学奖金。

6.3 贝克勒耳和放射性的发现

伦琴的工作开拓了一个奇妙的新领域，它直接导致了放射性的发现，这是一种合乎逻辑的历史继续。

X射线的发现，使公众和整个科学界都陷入极度的激动之中。公众显然被X射线的魔力所吸引，而科学家则在激动之余，冷静地思考一些更深刻的问题。

1896年初，彭加勒收到伦琴寄给他的论文和照片，他在1月20日的法国科学院会议上展示了这些资料。由于X射线的产生与真空玻璃管强烈的磷光有关，这使得彭加勒提出，被日光照射而发磷光的物质也应发出一种不可见的、有穿透能力的、类似于X射线的辐射。彭加勒的报告给他的同事贝克勒

耳留下了深刻的印象，会议之后，他立即开始进行这方面的研究，以检验彭加勒的假设。

贝克勒耳的祖父是一个电磁学权威，对磷光研究很有造诣，他的父亲在固体磷光研究方面也在欧洲名列前茅。贝克勒耳本人是法国自然历史博物馆应用物理学教授，他从1883年到1896年发表的关于磷光的论文已多达二十篇，赢得了国际上的声誉。

在彭加勒建议后不长时间，他于1896年2月24日向法国科学院提交了“论磷光辐射”的报告。他发现，硫酸钾铀酰在阳光下曝晒几小时后能发出一种射线，这种射线能穿透黑纸而使照相底片感光。在实验中，包底片的黑纸封皮用这种铀盐片压盖了一半，冲洗出来的照片表明，压着的地方比其他各处更黑。当把线圈或带有孔洞图案的金属片放在铀盐和黑纸之间时，便会得到这些金属物件的轮廓的照片。贝克勒耳认为，这种射线类似于X射线，其发射以太阳光对铀盐晶体的激发为条件。

在紧接着的下周的科学院会议上，贝克勒耳提出了不同厚度的铜箔对射线吸收情况的实验报告。他还指出，硫酸钾铀酰能够满意地被反射及折射的日光所激发。

巴黎的冬天有一半的日子都是阴晦的天气，贝

克勒耳不得不放慢自己的工作进程。2月26日和27日又是阴天，他把准备好了的几套干板夹和铀盐试验装置随便放到暗室的抽斗内，没有去管它们。过了几天，到1896年3月1日，贝克勒耳为了向第二天的科学院会议提供感光图象强度和磷光强度及持续时间关系的证据，冲洗了一张底片。使他感到目瞪口呆的是，底片压在铀盐下的部分异乎寻常的黑，而不是象平时晶体经过曝晒后那样的微黑。他又冲洗了一张，依然显示出同样的结果。他然后在暗室内又准备了一张照相底片，一个带有铝隔板的干板夹和一个钮扣形状的铀盐片。五小时后，冲洗出来的照片还是如此。贝克勒耳在3月2日的报告中说："我于3月1日冲洗出照相底片，希望能发现很微弱的图像。出乎意料的是，图像的轮廓十分强烈地显示出来。"

尽管如此，贝克勒耳并未放弃起初的假说。他解释道，这是由于在磷光现象中产生不可见射线的寿命要比物质发出磷光的寿命长的缘故。贝克勒耳之所以如此固执己见，是由于受到家庭传统思想的影响。实验家为了解开面临的疑团，有必要事先做出某种假设，但任何时候也不要把假设变成偏见，干扰清晰敏锐的判断。

贝克勒耳在暗室中研究了铀硝酸盐处于溶液中或再结晶后的情况。这时铀盐虽然不再发磷光，但是仍能放出射线。而且，在通常光线照射下不发可见磷光的铀盐也能发出与六价铀盐一样的不可见射线。在新事实面前，贝克勒耳不得不放弃原先的假设，他在1896年5月18日提交的报告“金属铀新辐射的发射”中说：“我研究过的铀盐，不论是发磷光的还是不发磷光的，结晶的、熔融的或是在溶液中的，都具有相同的性质，这使得我得到以下结论：在这些盐类中，铀的存在是比其他成分更重要的因素。”

在科学史上，当某一种成果出现的时机业已成熟时，由不同的人做出同一发现的事例是屡见不鲜的。英国的汤普森（S.P.Thompson）在贝克勒耳稍前一些时间也发现了铀盐的极强的感光作用，这一事实并未引起他的高度重视，他更感兴趣的是X射线，他只是把这一事实告诉了其他人，没有及时发表他的结果，从而失去了优先权。在贝克勒耳的发现中，由于天气的意外，偶然性无疑起着自己的作用，但是这种偶然性的背后也有必然性。事实上，当时的感光材料和照相技术都比较成熟，X射线的发现又把人们的注意力引向辐射现象的研

究。除了这些有利的外部条件外，加上贝克勒耳训练有素，有能力认识到意外现象的意义，有能力察觉被当时的人们看作是莫名其妙的东西，这种能力比偶然的幸运更为重要。的确，机遇只垂青那些懂得追求它的人。

在1896年上半年，贝克勒耳还进行了关于放射性的持续性的实验（放电实验和吸收实验），开始持续六天而不减弱，接着持续了十五天、两个月、八个月，最后持续了三年，最后的数字是1899年3月27日在《法国科学院会议录》上报道的。但是此后，他既没有对射线本质进行深入的探讨，也没有对其他放射性元素（“放射性”这个名称是居里夫人在1898年首先使用的）作系统的研究。贝克勒耳错误地相信，铀射线能够折射和偏振；他也盲目地认为，对铀射线比X射线了解得更为透彻（当时还未发现X射线的这些性质）。他虽然在1896年5月把铀盐发出的射线归因于铀的存在，但是并没有认识到这是铀原子本身的性质。于是，他觉得这个课题已没有多大搞头了，从而离开了这一领域。这一点从下面的统计数字可以明显看出：1896年他就铀射线发表了七篇文章（其中从3月1日到5月18日共发表了六篇），1897年只有两篇，而1898年连一

篇也没有发表。先驱者落伍了，这是值得深思的。

与X射线不同，贝克勒耳射线的发现并未引起多大反响，新发现的报道也没有在日报的版面上出现。柏林物理学会直到半年后的8月23日才宣布这一发现。从1896年5月底到1898年初，除了贝克勒耳的论文外，大概只有十余篇原始研究资料，其中关于铀射线的讨论属于次要论题，一部分还描述的是误入歧途的结果。仅有为数不多的人从事铀射线的研究，而且大都没有发现什么新东西，只不过是证实了贝克勒耳的结果而已。贝克勒耳本人和这个时期的研究者主要是进行定性的描述，并未进行系统的定量的测量。

这两年时间，是贝克勒耳射线研究的萧条时期。之所以造成这样的局面，大致有以下两个原因。其一是，X射线的实验设备较为普及，而且具有透视拍片的实用价值；而铀射线当时没有什么实用价值，而且没有几个实验室具备各种发光铀盐，纯铀在1896年才制备出来。客观条件限制了对铀射线的广泛研究。其二是，在新发现的潮流中，泥沙俱下，鱼龙混杂，大大冲淡了铀射线的重要性，使得许多科学家如坠烟雾，无所适从。

这是一个混乱的、迷惘的时期。当然也有一些

可靠的发现，例如1896年哥耳德斯坦发现的阳极射线，但更多的却是冒牌货，有些现在听起来简直叫人啼笑皆非。例如，1895年夏，魏德曼（E. Wiedemann）宣布，他从火花放电中发现了一种不可见射线，并煞有介事地称其为“放电射线”。汤普森说什么阴极射线分为两类：顺阴极射线和逆阴极射线，并说刚刚弄清洁的金属表面和其他物质也放出穿透辐射。1897年，勒·邦（G. Le Bon）声称，有光泽的金属用光照射后，也会发出射线，他称这种子虚乌有的射线为“黑光”。更为离奇的是，一位日本物理学家居然异想天开：夏天到处飞舞的萤火虫难道不是类似于X射线的某种射线的来源吗？他一本正经地做了实验，发现萤火虫隔着纸卡片能使照相底片感光。他说这是卡片因某种新射线的作用而引起所谓的“吸力效应”，犹如磁力线穿透其他物质一样。他还若有其事地把第二代萤火虫的详细研究结果于1898年发表在德国的《物理学杂志》上。结果，也有人检查了萤火虫，指出感光作用是由于虫子的湿气（至少是部分地）引起的，这使得那位发现者及其合作者大为丢丑。在这方面，闹得最热闹的恐怕是N射线了。法国科学院院士、南希（Nancy）大学教授布隆德洛（R. Blondlot，1849-

1930）声称，他发现应变状态的固体能发出一种新射线，这种射线能使萤光屏发光，并能穿透许多不透光物质。布隆德洛根据他所在学校的名子把这种新射线命名为N射线。1903年初，法国科学院年刊公布了这一发现，许多科学家都投入到新射线的研究中去，陆续发现太阳、人体肌肉和脑神经都能发出强烈的N射线。1904年，法国科学院给布隆德洛颁发了五万法朗奖金，不少人还围绕优先权发生了争执。后来人们弄清楚，这纯属心理-生理现象，根本没有什么N射线。看来，缺乏独创性的研究不仅使科学家白费力气，而且也会轻易扼杀一门新的学科。

6.4 电子存在的确证

在放射性问题的研究暂时处子停滞不前的时期，对阴极射线本性的探讨却相当活跃，结果导致了电子的确证，这当然也与X射线的发现的激励有关。

确证电子的存在是沿着两条不同的途径进行的：一条是J·J·汤姆孙对阴极射线粒子荷质比的测定，另一条是洛伦兹、塞曼根据电子论对塞曼效

应进行理论分析。

J·J·汤姆孙在1897年苦苦思索了前述的勒纳得实验（1894年勒纳得让阴极射线通过用0.000265cm厚的铝箔做成的小窗，成功地将阴极射线引到放电管外，这被看作是以太振动说的证据），他认为这个实验恰恰证明，阴极射线的粒子比原子小，因为原子是不能穿透铝箔的。他也发现，阴极射线在磁场中的偏转与残留气体无关。汤姆孙1897年4月30日在英国皇家学会首次讲述了他的看法：阴极射线是由比原子小的带电粒子组成的。接着，他发现阴极射线之所以在磁场中不偏转，是因为它使放电管内的稀薄气体具有导电性的缘故。于是，他提高了放电管的真空度，并加上适当的高电压，成功地使阴极射线在电场中得以偏转，他由此得出结论说，阴极射线是带负电荷的物质粒子。

阴极射线是原子，是分子，还是其他物质微粒呢？为了弄清这个问题，汤姆孙就这些粒子的质量和它们所携带的电荷之比（即荷质比e/m的倒数m/e）进行了一系列的测量。他使用了两种独立的方法。第一种是热学方法。使阴极射线在强度为H的磁场中偏转，设其偏转的曲率半径为ρ。用验电器测得粒子所携带的电量Q，用量热器测量粒子打到

固体上放出的热量W。假定粒子的动能全部转化为热能，这样一来，根据 $v=\frac{2W}{QH\rho}$ 和 $m/e=\frac{(H\rho)^2Q}{2W}$ 即可算出粒子的速度和荷质比。第二种是电场、磁场偏转法。这种方法是根据在均匀电场F中通过既定距离l时所产生的偏转角θ和在均匀磁场H中通过既定距离l所产生的偏转角φ来计算的。在实验中进行调整，使 $\phi=\theta$，即可根据 $v=\frac{F}{H}$ 和 $m/e=\frac{H^2l}{F\theta}$ 计算出有关数值。汤姆孙用第二种方法测得的m/e值是1.1～1.5×10^{-7}克/静电单位，用第一种方法测得的也是10^{-7}的数量级（现在的值是e/m=1.76×10^7静电单位/克，即m/e=0.596×10^{-7}克/静电单位），这与离子的m/e相比要小得多。是因为质量m小呢，还是电荷e大呢，或者是两种情况同时并存呢？汤姆孙根据阴极射线的平均自由程断言，阴极射线粒子与普通分子相比必定相当小。

1897年8月初，汤姆孙将上述实验结果汇集在“阴极射线”的论文中，该文于同年10月发表在《哲学杂志》上。在文章开头，汤姆孙阐述了带电粒子说比以太振动说更为优越的理由，他在文章结束时得出结论：“在阴极射线中，物质以某种新的状

态存在着。就这种状态而言，物质的微粒比通常的气体状态远远为小，……而且，处于这种状态的微粒就是构成一切化学元素的材料。”汤姆孙在这里把这种粒子叫作“微粒”（Corpuscle），后来他采纳了斯托内（G.J.Stoney）1891年提出的建议，把这种粒子命名为“电子”。

另一方面，塞曼在1896年发现，钠火焰在电磁铁的作用下，D线比通常情况下变宽了，这就是所谓的“塞曼效应”。塞曼认为洛伦兹的电子论能够解释这一现象，马上就把自己的发现和考察情况告诉他。洛伦兹立即说明了计算磁场中离子的方法，而且指出塞曼实验中变宽的谱线的两侧周边的光应该变成圆偏振光或线偏振光。塞曼根据洛伦兹的提示，果然观察到这一预言的现象，并由谱线的宽度计算出带电粒子的e/m，其值也是10^7的数量级，并且可以根据偏振光的左旋或右旋决定带电粒子的正负。塞曼于1896年10月在荷兰阿姆斯特丹科学院报告了这一情况。第二年5月到10月，他进一步报告了精密测定和计算的数值是$e/m = 1.6 \times 10^7$静电单位/克。汤姆孙和塞曼两人殊途而同归。

这样一来，关于电子的存在问题在1897年已基本得到确证。但是，由于实验测量和理论计算得到

的仅仅是荷质比，粒子比原子小只不过是推断而已，因此还有不少人对此将信将疑。确定电子的电荷和质量，自然成为下一步追求的目标。

J.J.汤姆孙选定了测定电荷的道路，他的学生汤森（John Sealy Edward Townsend，1868-1957）在1897年朝这个方向迈出了第一步。在此之前，人们就已推知，电子所带的电量与氢离子相同，其他物质粒子所带的电荷都是它的整数倍。

汤森测定了硫酸或苛性碱溶液电解时产生的氢离子的电荷。他让带电氢气通过饱和水蒸气，水蒸气便以氢离子为核而形成雾，他假定雾滴是分别以一个离子为核而生成的。一立方厘米气体所带的电荷可用象限静电计测定，雾滴的数目可用下述方法求得。让含雾的气体通过充满干燥剂的管子，由管子重量的增加可知形成雾的水的总重量。接着测定雾滴自由下落的速度，根据斯托克斯定理（以速度v在粘滞系数为μ的流体中运动的半径为a的球，受到大小为$6\pi\mu av$的阻力。该定理是斯托克斯在1850年根据流体力学的近似计算从理论上导出的），求出雾滴的平均质量，这样就能得到雾滴总数。总电荷数除以雾滴总数即是单个氢离子的电量，汤森测得的值是$e\approx 3\times 10^{-10}$静电单位。这种方法的缺点

在于，其中包含着离子数与雾滴数相等的假定，此外计算中所用的斯托克斯定理还未在实验上得到确证。

汤姆孙在1898年也做了类似的实验，只是求单位体积的总电量和雾的总质量的方法不同。他使雾滴在加有小电位差的电极板间移动，测出流过的总电量。雾的总质量是根据水气的膨胀比来推断的。汤姆孙测得的电量值和汤森的大致相同，他的方法也具有同样的缺点。

1903年，威耳孙（Charles Thomson Rees Wilson，1869-1959）想出了避免不明确假定的方法。他在水平放置的电极板间充入雾，求加电压与不加电压时雾滴的下降速度。如果根据斯托克斯定理求出了雾滴的质量，那就能由两种速度之比计算出雾滴的电荷。威耳孙测量了顶端的雾滴的下落速度，这相当于测出了最小荷电粒子的下落速度。因此，可以认为他测出的值表示了单位电量。但是，威耳孙测得的值不仅波动相当大，而且包含着两个不能令人满意之处：其一是利用了未经确证的斯托克斯定理；其二是观察雾滴的整体行为还不能断言确实测定了单个离子的电荷。

密立根是在一个不寻常的时期（1896-1897）开

始他的专业生涯的，这位十分尊重迈克耳孙方法论原则的美国物理学家，从1906年到1917年多次测量了基本电荷e的值。密立根认为，前人对e的测量包含着“全部理论上的不确定性”和“实验上相当可观的不准确性”。他找到了引起误差的四点原因（1.液滴下落经过的空气不是完全静止的；2.所加的电场不均匀；3.液滴在下落过程中逐渐蒸发；4.假定斯托克斯定理对于下落的液滴来说完全正确），并在实验装置方面进行了重大的技术改进。尤其是，他用不易挥发的油滴代替了易蒸发的水。

密立根的实验是这样的：让小油滴（设其所带电荷的密度为σ）在两个水平放置的金属平板间的空气（设其密度为ρ）中上下运动，两板相距16厘米，并用弧光灯照亮油滴。首先，从距装置2英尺外用望远镜观察测量某一油滴只受重力作用从上部下降某一距离所需的时间，求出它的下降速度v_1。然后，在两板间加上3000～8000伏/厘米的电场F，作用在油滴上的合力就使油滴徐徐上升，测量油滴上升到一定距离所需的时间，求出上升速度v_2。再利用油滴与空气间的粘滞系数μ以及当地的重力加速度g和修正了的斯托克斯定理，即可根据导出的公式

$$e = \frac{4}{3}\pi \left(\frac{9\mu}{2}\right)^{\frac{3}{2}} \left[\frac{1}{g(\sigma-\rho)}\right]^{\frac{1}{2}} \frac{(v_1+v_2)\,v_1^{\frac{1}{2}}}{F}$$

计算出电荷的值。

密立根1917年测得的值是4.774（±0.005）×10^{-10}静电单位（现在的精确值是 4.083×10^{-10}静电单位）。其实，汤姆孙1898年的实验无疑已确证了电子的实际存在。正如他明确指出的：电子是原子的构成要素，所谓带电本质上是原子质量的一部分自由地脱离了原来的原子而使原子发生分裂的一种现象，这种分裂是电子从原子分离出去而产生的。余下的部分原子带正电，与电子相比，它具有更大的质量，起着正离子的作用。尽管如此，密立根在他的《自传》中还是坚持认为，他的结果表明“电子本身……既不是不确定的，也不是一个假设，它是一个新的实验事实，是我们这一代人第一次看到的实验事实。”不过，应该看到，密立根的精密测量不仅获得了不可能用那个时代的实验手段来加以改进的最终结果，而且还具有另外的异乎寻常的意义——e值成为决定其他物理常数的重要基础。

6.5 居里夫妇发现了新的放射性元素

“山穷水尽疑无路，柳暗花明又一村”。在放射性研究方面，正当科学家走投无路之际，居里夫妇在1898年初以敏锐的眼力和坚韧不拔的毅力摆脱了迷宫，开辟了一个新天地。

居里夫人原名是玛丽·斯克罗多夫斯卡，1867年11月7日出生在波兰华沙一个教师家庭。中学毕业后，由于家境贫寒，她不得不搁置深造的计划，当了六年家庭女教师，但她仍利用不多的空闲时间坚持学习。1891年，她动身去巴黎，在索邦大学攻读物理学。1893年，她以第一名考取物理学硕士学位，1894年又以第二名考取数学硕士学位。在准备实验研究、撰写毕业论文期间，她遇上了实验物理大师皮埃尔·居里，他们于1895年结婚。从此，居里夫人和她的丈夫开始了共同的科学生涯。她两次荣获了诺贝尔奖金，成为科学史上最杰出的女科学家。

居里夫人猜想，铀射线是铀原子本身的性质，是否还存在其他一些象铀一样的元素呢？带着这个问题，她利用居里制作的象限静电计进行电流测量

（这种方法比感光法可靠得多）。具体做法是这样的：将试验用的铀或钍的化合物放在互相平行且相距3厘米的两极板间，两板加上100伏的电位差，用静电计量度通过的电流。结果发现，钍象铀一样，也具有放射性。她于1898年4月12日在《法国科学院会议录》上宣布了这一发现（同年4月15日德国人施密特〔G.C.Schmidt〕也宣布了同样的结果）。在1898年之前，铀被看作是唯一的放射性元素，钍放射性的发现开阔了人们的视野。

钍放射性的发现，使居里夫人肯定了原来的猜想。在当时，把放射性视为元素本身的性质是一个明显的进步。居里夫人观察到，沥青铀矿和铜铀云母的放射性比根据铀的含量计算出的要强得多，她确信，这些矿石可能含有一种比铀的放射性还要强的元素。

研究工作进入下一阶段。居里夫人明知浓缩放射性物质需要付出繁重的劳动，但她还是知难而进。居里受到她的坚强信念的感召，也中断了自己的研究。就这样，居里夫妇利用奥地利政府提供的几吨废铀渣，在既象马厩，又象土豆窖的"实验室"内，开始了艰巨的化学处理和繁复的物理测量工作。他们发现，与沥青铀矿相比，从中分离出的硫

化铋和硫化钡两种制剂具有更为强烈的放射性。如果把硫化铋在真空中加热到700°C，那么易于挥发的放射性成分便沉积在管子的冷处，这种升华物比铀的放射性强400倍。他们把这种经过确定的类似铋的金属叫做“钋”，以纪念居里夫人的祖国——波兰。1898年7月18日，居里夫妇把工作结果和尝试性的结论报告给法国科学院。

居里夫妇接着检查从沥青铀矿分离出来的能产生放射性的钡的化合物。通常的钡没有放射性，按照居里夫妇的假设，其中必定含有另一种未知的放射性元素。有证据表明，这种元素的放射性比钋还强，并且在化学性质上类似于钡。新元素被命名为“镭”。到1898年12月26日，他们确定镭的放射性比铀强900倍，到1899年又确定为7500倍，几个月后又增大到10万倍。他们还发现，如果把钋或镭的化合物和磷光物质叠在一起，那么磷光物质便持续发出微光，象一个光源一样起作用，可是外界并没有供给它能量。居里夫妇花了三年半时间确定镭的原子量。居里夫人还克服了巨大的困难，终于在1902年提炼出0.1克纯镭，并测得其原子量是225（而不是目前的226）。就这样，居里夫妇依靠敏锐的判断和惊人的毅力，在极为艰苦的条件下从事繁重的劳

动（居里夫人在这几年体重减轻了十公斤），终于取得了丰硕的成果。这样动人的事例，在科学实验的历史上谱写出新的篇章。

象伦琴一样，居里夫妇也放弃了他们的研究成果的专利权，他们认为专利保护是同科学精神相抵触的。居里夫人说："镭不应当成为任何个人发财致富的工具。镭是元素，它属于全世界！"她认为："在科学中，我们应该关心的是事物，而不是个人。"

对于放射性现象的解释，进展是比较缓慢的。居里夫人自己也承认，这是由于实验数据说明，铀、钍、镭，可能还有锕的放射作用都是恒定的。虽然在1902年发现了钋的放射性衰减，但她认为这是一个例外。尽管从1899年1月以来，居里夫妇就想到放射性物质的不稳定性，但是由于他们受到当时在法国流行的实证主义和唯能论思潮的影响，这不仅使他们过于谨慎，而且事先就倾向于一种毫无结果的热力学模型。他们错误地认为，放射性物质的射气（Emanation）不是普通的物质，而是一种能量，从而妨碍了他们走卢瑟福在1903年所走的道路。

6.6 卢瑟福和索迪提出嬗变理论

在1899年以前，物理学家关心的只是新的放射性物质的研究。当时在加拿大工作的英国物理学家卢瑟福从1899年开始研究放射性时起，就把他的注意力放在仔细研究放射性的本性上。

卢瑟福1871年生于新西兰的一个手工业工人家庭。1895年大学毕业后到英国剑桥大学卡文迪许实验室实习，成为该实验室主任J·J·汤姆孙的学生和助手。1898年，在汤姆孙的推荐下，他担任加拿大麦基尔大学的物理学教授。1907年，他返回英国，任曼彻斯特大学教授。1918年他接替退休的汤姆孙的职位，1925年他当选为英国皇家学会主席。

卢瑟福利用铝箔，检查铀射线的贯穿本领。他发现，铀射线由两种辐射构成：一种贯穿本领小，他命名为α辐射；另一种贯穿本领比α辐射强100倍左右，他称之为β辐射。几个月后，β辐射的粒子本性几乎同时在德国和法国通过磁场中的实验揭示出来了。1900年1月8日，居里也报告了他的实验结果，镭射线也由两部分组成：一种显然是不偏转且易吸收的（现在知道是α射线），另一种有贯穿本领且

能被磁场偏转（现在知道是β射线）。1900年4月30日，维拉德（Paul Villard，1860-1934）报告，他发现了一种贯穿本领极强且不受磁场偏转的射线，这被叫做γ射线。

就在1900年，居里夫妇把β射线收集在金属圆筒内，确定它带负电荷。同年，贝克勒耳根据β射线在电场内及磁场中的偏转，测定了所设想的β射线粒子的荷质比，得到与电子荷质比大体相同的数值，这就证明了β射线是高速（据贝克勒耳测定，其速度接近光速之半）运动的电子。关于α射线，卢瑟福从1902年起做了一系列工作，使α射线在磁场中弯曲，测定它的荷质比及所带电荷，最后在1909年根据光谱分析确认，它是氦的二价正离子。至于γ射线的本性，从1900年发现以来一直存在着粒子说与电磁波说之争，又是卢瑟福在1914年根据晶体对γ射线的衍射证明，后一种说法是正确的。

从1899年开始，卢瑟福和其他人也研究了放射性物质的射气和淀质（deposit），而且发现了放射性物质蜕变的指数规律。在这些工作的基础上，卢瑟福与化学家索迪（Frederick Soddy，1877-1956）合作，从1902年9月起先后发表了四篇开创性的论文，提出了如下内容的放射性嬗变说。1.射线

的放出伴随着放射性物质转化为其他种类的新物质；2.射线是由带电粒子组成的，其粒子放出本身就是一种放射性变化；3.在发生放射性变化时，化学原子破坏了；4.由实验发现的指数规律$I_t = I_0 e^{-\lambda t}$（I是电离电流密度，λ是蜕变常数，t为时间）可以导出放射性变化的规律$dNt/dt = -\lambda Nt$（Nt是时刻t的原子数）。

对于放射性现象的发现和嬗变说，起初也遭到坚持旧观念和传统偏见的人的反对。例如，斯托克斯在1897年的讲演中还用一个明显偏爱的力学模型解释铀射线的折射和偏振，他认为铀分子是一种末端很轻的柔韧的链条状的东西。发现元素周期律的俄国大科学家门捷列夫（Д.И. Менделеев, 1834-1907）依然固执己见："关于元素不能转化的概念特别重要，……这是整个世界观的基础。"他自己不仅对新事物表示怀疑，而且还鼓动青年人和其他科学家不要相信它们。还有相当一批人反对放射性元素本身潜藏着大量的能的观点，他们千方百计地从外部寻求能源。可是在1903年3月16日，居里和拉博德（A.Laborde）报道了镭的热效应。卢瑟福和巴恩斯（Barnes）在1904年2月测定了每克溴化镭的热发射是65卡/小时，每克纯镭是110卡/

小时。可是从外部寻求能源的做法却一事无成，结果放射性嬗变说得到公认。

1903年前后卢瑟福和索迪的原子嬗变理论以及居里和拉博德的镭的热效应的发现又一次引起了轰动，放射性的研究又掀起了一个新的高潮。据统计，从贝克勒耳发现放射性起到1902年10月31日为止的七年间，出现在《自然》杂志各种索引中关于放射性的条目总共才有大约60个，而在接着的两年内，同样的条目多达260个。各种普及杂志和报纸也充满着热情洋溢的标题。如美国圣路易斯1903年的报纸这样写道："自然界最神秘的物质：镭"，"它的威力将是不可思议的"。卢瑟福1904年出版了《放射性》一书，总结了在此之前的各种研究成果。书中不仅列举了在这一领域做出杰出贡献的五位著名人物（贝克勒耳、居里夫妇、卢瑟福、索迪），而且还提到了65个人的名字。

此后，关于原子蜕变的研究一直稳步发展着。从1904年起，人们逐步搞清了铀、钍、锕三个放射性元素的系列。索迪于1913年发现了放射性蜕变的位移定律，在此稍前的1910年，他就提出了同位素的假说，这一假说在1914年获得实验证明。1919年，卢瑟福用高速的α粒子轰击氮原子核，第一次实现

了原子核的人工蜕变。在卢瑟福的指导下，科克罗夫特（John Douglas Cockroft，1897-1967）和沃尔顿（E.T.S. Walton）于1923年用70万伏高压加速的质子轰击锂。这个实验是首次完全人为的核蜕变。从此，许多人都开始进行类似的实验。在原子物理学的早期发展中，卢瑟福做出了不可磨灭的贡献，为此获得1908年度的诺贝尔物理学奖金。

6.7 原子结构模型

随着实验研究的进展和理论探讨的深入，关于原子结构的理论也日臻完善，各种原子模型相继问世。其中有洛伦兹的弹性束缚电子（1896年），开耳芬的包含电子的正电云模型（1897年），勒纳得的动力子概念（1903年），J·J·汤姆孙的正电原子球无核模型（1904年），长冈半太郎（Hantaro Nanaoka，1865-1950）的土星系模型（1904年），里兹的磁原子（1908年），卢瑟福的有核模型（1911年），玻尔的半量子化原子模型（1913年）。汤姆孙、卢瑟福和玻尔的模型是影响较大的几种。

J·J·汤姆孙在1904年提出，原子好象一个带正电的球，这个球承担了原子质量的绝大部分，电

子作为点电荷镶嵌在球中间。这种“葡萄干蛋糕”式的无核模型是汤姆孙企图解释元素化学性质的周期性而反复思考出来的。汤姆孙假定，原子辐射是由于电子在它们的平衡位置附近的感应振荡。洛伦兹在1906年也提出了类似的无核模型。

卢瑟福开始也相信无核模型，他想和他的合作者盖革（Hans Geiger，1882-1945）、马斯登（Ernest Marsden，1889-1970）通过研究α粒子的散射来加以确证。他们1909年的实验表明，散射角是极小的。可是在1910年的实验中，他们却发现也有极少数（万分之一）超过90°甚至达到180°的大角度散射。根据统计理论计算，只有比1%少得多的α粒子的散射角大于3°，而散射角超过90°的几率只有$1/10^{3600}$。对此，卢瑟福深表惊讶：“这是我一生中从未有过的最难以置信的事件。它的难以置信好比你对一张纸射出一发十五英寸的炮弹，结果却被弹了回来反而打在自己身上。经过思考，我认为反向散射必定是单次碰撞的结果，而当我作出计算时看到，除非采取一个原子的大部分质量集中在一个微小的核内的系统，是无法得到这种数量级的任何结果的。这就是我后来提出的原子核心具有小体积和大质量的想法。”在这个实验的基础上，卢瑟

福于1911年提出了有核模型，它与长冈1904年的土星系原子模型相类似。

在卢瑟福的有核模型中，原子中心有一个质量几乎等于原子总质量的核，核所带的电荷等于Ze（Z为原子序数，e为电子的电量）。在原子核的周围，在比原子核半径约大一万倍的地方存在着Z个电子，从而整个原子呈电中性。但是，这个原子模型是不稳定的。因为电子在行星轨道中是不断加速的，根据经典电磁理论，它应该不停地辐射出能量，最终必将落入原子核中。

为了克服这个困难，玻尔在1913年依据当时的实验事实提出了一种半量子化的原子模型，后来又经过索末菲（Arnold Sommerfeld，1868-1951）等人的修正和改良，成功地解释了元素周期律和其他原子现象。在本世纪二十年代以后，人们通过实验不断揭示出原子内部的奥秘。随着量子论的发展和量子力学的建立，原子结构理论成为它的一个分支，才获得了明确的理论阐述。

第七章

爱因斯坦开拓了一个奇妙的世界

物理学革命的一个产物是相对论。可以毫不夸张地说，这个奇妙的新世界基本上是爱因斯坦一手开拓的。为此，这位物理学革命的先锋和主将理所当然地赢得了应有的声誉，但是人们对他的深邃思想的接受似乎比他本人构筑这种思想体系还要艰难。海森伯曾经说过："在科学史上，以往也许从来没有过一个先驱者象阿尔伯特·爱因斯坦和他的相对论那样，在他在世时为那么多的人所知道，而他一生的工作却只有那么少的人能够懂得。然而，这个名声是完全有理由的。因为有点象艺术领域中的

达·芬奇或者贝多芬，爱因斯坦也站在科学的一个转折点上，而他的著作率先表达出了这一变化的开端；因此，看来好象是他本人发动了我们在本世纪上半期所亲眼目睹的这场革命。”

在叙述爱因斯坦创立狭义相对论之前，我们先回顾一下先驱者们的工作，尤其是洛伦兹和彭加勒的贡献。

7.1 相对论的先驱：洛伦兹与彭加勒

前面讲过，为了消除菲涅耳理论与迈克耳孙实验结果之间的矛盾，洛伦兹于1892年11月在荷兰阿姆斯特丹科学院提出了收缩假说。这位二十一岁就获得博士学位、精通法德英文的荷兰物理学家提出了一个大胆的假定，处于地球运动方向的干涉仪的那个臂比另一个臂缩短了$\frac{1}{2}Lv^2/c^2$（在这里，洛伦兹用的是近似式，严格地讲应为$L/\sqrt{1-v^2/c^2}$。其中L为臂长，v为地球公转速度，c为光速（下同），以此解释了迈克耳孙实验的否定结果。

洛伦兹认为：“初看起来，这个假设似乎不可思议，但我们不能不承认。这决不是牵强附会的，

只要我们假定分子力也象电力和磁力那样通过以太而传递（至于电力和磁力，现在可以明确地作这样的断言），平移很可能影响两个分子或两个原子之间的作用，其方式有点类似于荷电粒子之间的吸引与排斥。既然固体的形状和大小最终取决于分子作用的强度，因此物体大小的变化也就不会不存在。”

在提出收缩假说后，洛伦兹进一步探讨了以太和地球相对运动对其他电磁现象和光现象的影响问题。1895年，他发表了“运动物体中电磁现象和光现象的理论研究”。在这篇论文中，他不仅进行了个别的讨论，而且证明了普遍保证一阶效应不能显示出来的状态对应定理：“设在静止参照系中存在着以x，y，z，t为变数表示的电磁状态，那么在具有同样物理构造并以$\vec{v}$运动的参照系中，以相对坐标x'，y'，z'和当地时间t'为独立变数的同样的函数所表示的电磁状态也必定存在。”在这里，所谓相对坐标就是固定在运动系中的坐标，所谓当地时间就是用$t'=t-\vec{t}\cdot\vec{v}/c^2$定义的时间，其中$\vec{r}$是相对于静止系的位移。现在看来，这个定理在一次近似下表示了洛伦兹协变性。可是，洛伦兹当时并无此意，当地时间只不过是为了数学上的方便而引入的辅助变数而已。

1895年的理论仅仅是完成了一次近似，用它还不能说明迈克耳孙实验。用收缩假说虽然可使矛盾得以解决，但是该假说和他的理论体系并没有本质的联系。因此，洛伦兹努力提高对应态定理适用范围的阶数，企图使它成为一个严密的定理。彭加勒的中肯批评和后来的两个实验加快了洛伦兹的工作进程。

1900年，彭加勒在巴黎召开的国际物理学会议上作了“实验物理学和数学物理学的关系”的讲演。在这篇讲演中，他特别谈到，洛伦兹理论是现存理论中最使人感到满意的理论，但是也有修正的必要。他认为，假使为了解释迈克耳孙实验的否定结果，需要引入新的假说，那么每当出现新的实验事实时，也同样有这种需要。毫无疑问，对于每一个新的实验结果引立一种特殊假说，这种作法是不自然的。假使能够利用某些基本假定，并且不用忽略这种数量级或那种数量级的量，来证明许多电磁作用都完全与系统的运动无关，那就更好了。其实，彭加勒在1899年的一次讲话中就谈到这种看法。

彭加勒的批评给洛伦兹指出了努力的方向，但促使他最后下决心改善先前理论的是瑞利、布雷斯

(De Witt Bristol Brace, 1859-1905) 以及特劳顿 (Frederick Thomas Trouton, 1863-1922)，诺布耳 (H. R. Noble) 的实验。

按照洛伦兹的收缩假说，假使物体在运动方向缩短，那么它的密度就会因方向而异，这样一来，透明体理应显示出双折射现象。瑞利在1902年做了实验，并未发现预期的现象。布雷斯在1904年重复了这个实验，依然得到否定的结果。按照同样的假说，如果使电容器的极板与地球运动方向成一角度，那么当给电容器充电时，应该存在使电容器极板转向地球运动方向的力偶作用。可是在1903年，特劳顿和诺布耳把电容器固定在灵敏的扭秤上，这种扭秤的灵敏度足以测出该数量级的力偶矩，然而他们在实验中却没有观察到任何效应。

洛伦兹面对事实，抱定彻底解决而不是近似解决所有问题的决心，经过重新努力，终于在1904年5月完成了题为"速度小于光速系统中的电磁现象"的论文。洛伦兹1904年的理论是以麦克斯韦方程和作用在电荷上的力（后来称为洛伦兹力）的表达式为基础的，其中麦克斯韦方程在相对于以太固定的参照系 (x, y, z) 中是成立的。他的目的是研究以匀速 v 沿x轴方向运动的物理系统中所发生的电磁

现象，以阐明该现象显示不出任何运动效应。他发现，利用原先的方程和表达式在相对以太运动的参照系中处理问题是极为复杂的，为了避免不必要的麻烦，他作为一种数学技巧引入了新的变数——相对坐标和当地时间：

$$x' = \beta l x,\quad y' = l y,\quad z' = l z,$$

$$t' = \frac{l}{\beta} t - \beta t \frac{v}{c^2} x ,$$

其中 $\beta^2 = \frac{c^2}{c^2 - v^2}$，即 $\beta = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$。并且，应该把系数 l 看作是 v 的函数，当 $v = 0$ 时，则 $l = 1$，对于微小的 v，l 与 1 相差不过是一个二阶量。在定义了新的电位移矢量和磁场强度矢量后，他又假定了电荷密度和速度之间的变换式。他把新变数代入原方程之中，得到了带撇变数的新方程，它与原方程具有几乎相同的形式。

就这样，洛伦兹在没有忽略所有各阶项的情况下得到了对应态定理。尽管洛伦兹事先声称，他的这篇论文是以“基本假定”而不是以“特殊假说”为基础的，但为了达到他的既定目标，还是采用了十一个特殊假说。洛伦兹从他科学生涯一开始就着手计划把菲涅耳关于以太和物质相互作用的思想与

麦克斯韦电磁场理论以及韦伯（Heinrich Friedrich Weber，1842—1913）、克劳修斯电的原子观点统一起来。1904年的理论就是这一目标的最终实现。尽管洛伦兹企图在经典理论的框架内解决新实验事实和旧理论的矛盾，可是某些结论却超出了这个框架（例如粒子质量随速度而变化，粒子在以太中运动的速度不能大于光速）。

彭加勒极为热情地接受了洛伦兹的理论，他从数学上给洛伦兹理论以更为简洁的形式。他把洛伦兹的坐标与时间变换式命名为洛伦兹变换，并论证当$l=1$时，该变换形成一个群。彭加勒还推广了洛伦兹理论，导出电荷和电流密度的变换关系，他甚至（虽然是隐含着）使用了四维表达式。实际上，伏格特（W. Voigt）在1887年，拉摩于1900年已分别发现了类似的变换式，只是由于没有认识到它的重要意义，因而并未引起人们的注意。

彭加勒主要是一个数学家，而洛伦兹主要是一个理论物理学家。可是谈到对相对论发展的贡献，情况却恰好相反：洛伦兹提出了许多数学表达式，而彭加勒却提出了普遍原理。

1895年，彭加勒在研究拉摩的电磁理论的论文中首次出现了相对性原理的提法。在那里他说，从

各种经验事实得出的结论能够概括为下述断言："要证明物质的绝对运动，或者更确切地讲，要证明可称量物质相对于以太的运动是不可能的。"1899年，他在巴黎大学讲演时说："我认为很可能，光学现象只依赖于物体的相对速度。……在光行差常数中，如果不忽略二阶或三阶量，这也许是正确的，但却不是严格正确的。当实验变得越来越严格，这一原理也将变得越来越精确。"第二年（1900年），在巴黎举行的物理学会议上，他再次重申了同样的观点："我不相信……除了物体的相对位移之外，更严密的观察将会使其他东西明显起来。"对于所有各阶"都必须找到同一解释，……这种解释同样完满地适用较高阶的项，这些项的相互对消将是严格的绝对的。"相对性原理这个术语是彭加勒1904年9月在圣路易斯国际技术和科学会议的讲演中首次使用的。由于这一原理，"物理现象的定律对'一个固定的观察者'与对于一个相对于他做匀速运动的观察者必定是相同的。这样一来，我们没有，也不可能有任何识别我们是否做这一运动的手段。"

彭加勒在1898年还第一个讨论了假设光速对所有观察者都是常数的必要性。在这一年发表的"时

间之测量”一文中，彭加勒指出：光具有不变的速度，特别是光速在所有方向上都相同“是一种公设，没有这一公设，就无法测量光速。”他还指出：“绝对空间是没有的，我们所理解的不过是相对运动而已”。“绝对时间是没有的，所谓两个历时相等，只是一种本身毫无意义的断语”。“不但我们没有两个相等的时间的直觉，并且我们对于两地所发生的两事件的同时性也没有直觉”。在同一篇文章中，彭加勒还讨论了用交换光信号确定两地同时性的问题。在1902年出版的《科学与假设》中，他又一次重申了上述观点。几乎没有什么疑问，到1900年，彭加勒手头已经具备了建造相对论的所有必需的材料。在1904年圣路易斯会议的讲演中，他还惊人地预见了新力学的大致轮廓。

在十九世纪末，运动物体电磁现象的研究取得了进展，因电气技术发展而提出的单极电机问题引起了物理学家的兴趣。所谓单极电机，就是使一个圆筒形的磁铁绕轴旋转，把转轴和筒壁用导线联结起来，回路就有电流流过（单极感应）。这时，感应电动势在回路的什么地方产生呢？磁铁旋转时，磁力线随之一起旋转呢，还是停留在一个固定的位置上呢？这个问题在1900年前后成为物理学家的中

心议题之一，实际上相当于如何使包括有可动物体系统中的电磁现象理论化的问题，属于动体电动力学的内容。1900年，科恩（E. Cohn）继续坚持赫兹在1890年“关于动体电动力学的基础方程式”一文中提出的观点（以太并不独立于物体运动，力线并非物质的特殊状态，它只是一种符号等等），尝试用动体电动力学来处理当时面临的实际问题。科恩也把世界分为以太和电子，而不论及运动参照系中的现象是如何被看到的；他始终把物体当作宏观的、一成不变的东西来处理，论述物体运动时内部发生的电磁现象。科恩也引入了与洛伦兹相同的当地时间作独立变数，找到了可以变为与静止物体的麦克斯韦宏观方程形式严格相同的方程式，把它作为运动物体的方程式。用今天的眼光来看，其引入注目之处在于，他能根据近于协变性的想法导出方程式。尽管科恩当时并不清楚它的意义，但他导出的方程式能说明大多数实验事实，因而在那时还是有影响的。

7.2 爱因斯坦的思想发展

在爱因斯坦于1905年完成狭义相对论论文的前

夕，正是洛伦兹和科恩这两种理论之花争香斗艳的时候，迈克耳孙-莫雷实验已完成将近二十年了。以往许多教科书和文章在介绍相对论的诞生时，都把上述背景看作是爱因斯坦创立相对论的基础和出发点。这是不符合事实的。爱因斯坦1954年2月9日给达文波特（F. G. Davenport）的信中说："在我本人的思想发展中，迈克耳孙的结果并未引起很大的反响。我甚至记不得，在我写关于这个题目的第一篇论文时（1905年），究竟是否知道它。对此的解释是：根据一般的理由，我坚信绝对运动是不存在的，而我所考虑的问题仅仅是这种情况如何能够同我们的电动力学知识协调起来。因此人们可以理解，为什么在我本人的努力中，迈克耳孙实验没有起什么作用，至少是没有起决定性的作用。"爱因斯坦在其他场合几次述说了同样的观点。无论就爱因斯坦的思想发展和论文内容来看，还是就他的个人品质和为人来看，他的话都是可信的。至于有人说爱因斯坦的相对论是洛伦兹等人工作的直接继续，这也与事实不符。事实上，爱因斯坦当时只不过是瑞士伯尔尼专利局的一名默默无闻的小职员，他既未处于当时的科学中心，又与学术界知名人士没有什么往来，对于科恩的理论和洛伦兹1895

年后的论文他是不可能了解到的。这从下述事实不难看出。洛伦兹1904年的论文是在荷兰的杂志发表的，德国皇家图书馆只有一本，而且只许借阅一天。当时在柏林大学理论物理教研室作普朗克助手的劳厄还不得不向洛伦兹直接索要复印本，地位卑微的爱因斯坦怎么会有机会看到洛伦兹的文章呢？

爱因斯坦不象洛伦兹那样，孜孜不倦地解决迈克耳孙实验和其他实验所提出的疑难，千方百计地弥合各种实验与经典理论的裂痕。爱因斯坦关心的是力学和电动力学形式上的不一致。在向他的既定目标前进中，他既继承了前人的思想精华，也摒弃了一些陈旧的传统观念。相对论的诞生也向我们证明了“这样一个人物的天才和独创性，他能够一眼看穿那疑难重重、错综复杂的迷宫，领悟到新的、简单的想法，使得他能够吐露出那些问题的真实意义，并且给那黑暗笼罩的领域突然带来清澈和光明。”（德布罗意语）

爱因斯坦通过两个渠道吸收了前人丰富的思想财富：一是通过赫兹等人的著作掌握了电磁理论，受到了启迪，特别是弗普尔的教科书无论从内容和形式方面都给他以极大的教益；二是从马赫、休谟、彭加勒等人的著作中掌握了批判思想，彻底摆脱了

绝对时空观的束缚。

爱因斯坦在苏黎世联邦工业大学上学时，最使他着迷的课题是麦克斯韦理论。据爱因斯坦本人回忆，当时老师在课堂上并不讲授这些内容，于是爱因斯坦除了在物理实验室外，其余时间就通过亥姆霍兹、玻耳兹曼、赫兹等人的著作如饥似渴地学习麦克斯韦理论。在亥姆霍兹五卷本的《理论物理讲义》中，第一卷有一半讲了哲学和认识论问题，但却很少谈到具体实验，甚至在讲解有关以太问题的内容中，也未提及迈克耳孙实验，尽管该实验在亥姆霍兹的赞同下第一次完成了。从亥姆霍兹写的关于麦克斯韦理论的书中，爱因斯坦能够得到的东西首先是增强了研究认识论的自觉性，并且从书中他还了解到有关证实以太的实验还不能看作是决定性的。在玻耳兹曼所写的“涉及到纯粹以太运动的麦克斯韦理论的结果”的论文中，一次也没有提到具体的实验。爱因斯坦也学习了赫兹选集和在电磁学中所用的符号，这些符号他以后经常使用。爱因斯坦看到赫兹的第一批内容深刻的文章是：1884年发表的“麦克斯韦电动力学基本方程”、1890年发表的有意识地冠以“关于动体电动力学的基本方程”题目的文章。即使这位伟大的电磁实验家也未明确提

到以太实验，但在现今的相对论起源的讨论中，以太实验似乎是很重要的。赫兹著作的另一个作用是促使爱因斯坦转向马赫，因为赫兹把许多思想都归功于马赫的《力学》一书。这三位德国物理学家对爱因斯坦的影响是显而易见的。

据美国著名科学史家、爱因斯坦问题研究专家霍耳顿考证，无论从形式或从内容来看，爱因斯坦1905年的论文都不能恰当地解释为属于洛伦兹-彭加勒系列，或麦克斯韦-亥姆霍兹-玻耳兹曼系列，甚至是基尔霍夫-马赫-赫兹系列。一位几乎被遗忘了的老师是弗普尔（August Föppl），他于1894年出版的《麦克斯韦电理论导论》一书直接影响了爱因斯坦的思考过程，从而导致了1905年的论文。弗普尔的名字对德国老一代的科学家和工程师来说也许还能隐约记得，但对其他人来说也许全然无知。显然，他的名望与上述三位德国著名物理学家不能相提并论，以致爱因斯坦在回忆中以“等人”二字略而未提。

由于弗普尔具有把麦克斯韦理论清楚地讲解给工程技术人员的能力，所以他的书很畅销。该书分为六个部分，其中第五部分特别有趣。这部分的题目是“运动导体的电动力学”，它的第一章是“由

运动而引起的电动力感应”，第一章中的第一节是“空间中的相对运动和绝对运动”，它是以异乎寻常的议论开始的：“运动学即运动的一般理论的讨论通常基于下述公理：在物体的相互关系上只有相对运动是有意义的。在这里不能求助于空间中的绝对运动，因为手头如果没有观察和度量这种运动的参照对象，那么要发现这种运动就毫无意义。……根据麦克斯韦理论和光学理论，空洞的空间实际上根本不存在，即使所谓的真空也充满了以太介质。”“没有这一内容〔以太〕的空间概念是自相矛盾的说法，这就象没有树木的森林那样不可思议。完全空洞的空间概念根本不会受到可能的经验的支配；或者换句话说，我们必须首先对这种空间概念做出深刻的修正，这种空间概念在它的原来的发展时期给人类思想打上了烙印。解决这一疑问也许成为当代科学最重要的问题。”（着重号为原书所加）弗普尔在这里虽然并没有准备放弃以太或绝对运动，但他了解物理学最重要的问题在什么地方，这无疑对爱因斯坦是一种启示。作者以同样的方式继续写道：“当我们在下面利用相对运动的运动学定律时，我们必须谨慎地进行。我们没有必要把这种使用当做一种先验的确立的东西，例如不管磁铁在一

个静止的电路附近运动，或者当磁铁处于静止而电路运动，定律的使用都是完全相同的。”作者还加上一个颇为熟悉的思想实验，他设想了第三种情况——导体和磁铁两者一起运动，它们之间没有相对运动。他说，在这种情况下，实验表明“绝对运动”本身在磁铁和电路无论哪一个上也不产生电力或磁力。这种思想实验足以表明，在原来两种情况中考虑的只是相对运动。这一切，无疑对爱因斯坦具有极大的吸引力。事实上，就1905年论文的形式和风格而言，弗普尔思想的影响远比其他人更大，爱因斯坦1905年的论文就是以上述思想实验开始的。弗普尔的书给了爱因斯坦以具体指导，有助于爱因斯坦思路的展开，使他采取了一种大异其趣的方式，这种方式既不同于学校传授给他的，也不同于第一流物理学家著作中所使用的。凡是看过爱因斯坦原始论文的人都不难发现，该文在构思、形式、风格上，都与弗普尔的书有某些相似之处。当然，这并不是说，在弗普尔的思想与爱因斯坦的相对论之间存在着一种简单的因果链条。

对哲学和认识论的研究也极大地促进了爱因斯坦相对论的创立。在学生时代，爱因斯坦就对哲学兴味盎然。1902年3月下旬，他与新结识的朋友索洛

文和早些时候认识的朋友哈比希特经常利用晚上举行聚会——他们诙谐地称这种聚会为“奥林比亚科学院”——讨论各种感兴趣的问题。在探讨科学和哲学最深奥的问题时，他们兴致极浓、劲头十足，往往引起长时间的热烈争论。这种聚会一直持续到1905年11月，使爱因斯坦获益匪浅。其间，他们讨论了休谟的《人性论》、马赫的《力学》、彭加勒的《科学与假设》以及其他人的有关著作。休谟关于实体和因果性的特别聪明而尖锐的批判对爱因斯坦的影响大概比较一般化，而休谟的时空观念对他的影响可能是直接的。休谟认为，空间观念是建立在对象的排列基础上，这种对象是可触知的；而时间观念是建立在对象的连续的基础上，这种对象是能够变化的，可觉察的。至于马赫对爱因斯坦创立相对论的影响，前面已作了较为详尽的叙述。特别是彭加勒的书，对他们的印象极深，他们用好几个星期紧张地读它，彭加勒的科学思想和批判精神对爱因斯坦必定有所启示和激励。

相对论的创立并非一蹴而就。正如爱因斯坦1952年3月11日写给泽利希(Carl Seelig)的信中所说：“在狭义相对论的思想概念和相应的发表结果之间大约经过了五、六周时间。但是，如果把这认

为是诞生日期，也许很难说是正确的，因为早在几年前，论据和建筑材料已经准备好了，虽然我还没有下根本的决心。”

的确，有关狭义相对论的思想概念在爱因斯坦的头脑里足足酝酿了整整十年。他后来回忆了自己思想的发展过程。

爱因斯坦从小就具有强烈的好奇心。当他还是一个四、五岁的小孩时，父亲让他看一个罗盘，他为罗盘针以如此确定的方式行动而惊奇不已，留下了深刻而持久的印象。在十二岁时，一本欧几里得平面几何的小书使他经历了另一种性质完全不同的惊奇：书中的许多定理并非显而易见，但是却可以可靠地加以证明，没有丝毫怀疑的余地。爱因斯坦后来说：“这种‘惊奇’似乎只是当经验同我们的充分固定的概念世界有冲突时才会发生。每当我们尖锐而强烈地经历这种冲突时，它就会以一种决定性的方式反过来作用于我们的思维世界。这个思维世界的发展，在某种意义上说就是对‘惊奇’的不断摆脱。”

爱因斯坦在十五岁时，有一位来自波兰的犹太大学生向他介绍了《自然科学通俗读本》一书。尽管该书的内容已显陈旧，但丰富的材料和生动的

叙述仍使他入神地读完了它。在这本书中，他碰到了对光速这一自然现象的分析，这在十二年之后对创立狭义相对论具有奠基性的意义。当十六岁的爱因斯坦在瑞士阿劳州立中学上学时（1895年），他就无意中想到一个悖论：如果以速度 c（真空中的光速）追随一条光线运动，那么就应该看到，这样一条光线就好象一个在空间振荡而停滞不前的电磁场。可是无论依据经验，还是按照麦克斯韦方程，看来都不会发生这样的事情。从一开始，他在直觉上就很清楚，从这样一个观察者的观点来判断，一切都应当象一个相对于地球是静止的观察者所看到的那样，按照同样的定律进行。这个悖论又使爱因斯坦感到“惊奇”，他为此沉思了十年。实际上，这个悖论已包含有相对论的萌芽。当时，爱因斯坦还是一个纯粹的经验主义者，热衷于用观察和实验来研究物理学的主要问题。第二年（1896年）进入苏黎世联邦工业大学后，他计划完成检测地球运动引起光速变化的实验，为此他设计出一个用热电偶测量两束方向相反的光所携带的能量差的实验。可是，他的老师不支持他，他也没有机会和能力建造这种设备，事情就这样不了了之。其实，他也没有抱成功的希望，因为他对实验的结果疑虑

重重。这时，他并不了解迈克耳孙-莫雷实验，即使后来知道这个实验，他也不会对该实验结果感到惊奇，因为这不过是确证了他的想法而已。可以看出，从很早的时候起，爱因斯坦就预想到相对性原理。

年轻的爱因斯坦深思了光现象和电磁现象与观察者运动的关系，他花了些时间企图修正麦克斯韦方程，因为麦克斯韦方程在静止系中是正确的，在相对于静止系匀速运动的系统中就不正确了。但是，他没有取得成功。爱因斯坦还试图用麦克斯韦、洛伦兹方程处理菲索关于菲涅耳拖动系数的实验。他相信，这些方程是正确的，它们恰当地描述了实验事实，它们在运动坐标系的正确性表明了所谓光速不变的关系，可是这与力学中的速度合成法则却格格不入。爱因斯坦尝试用某种方法将力学运动方程和电磁现象统一起来，他遇到了困难。于是他不得不花一年时间冥思苦想，在那个时候，他甚至考虑了光的微粒说的可能性。

这些年，爱因斯坦致力于用下述途径修正麦克斯韦方程：他想得到一种电磁现象和光现象的理论，在这种理论中，只有相对运动才具有物理意义。他给自己提出了一个与理论形式而不是与理论

内容有关的问题。直到1900年普朗克开创性的工作后不久，他发现辐射在能量上具有一种分立结构，当然这种结构是与麦克斯韦理论相矛盾的，这时他才清楚地意识到，只靠纯粹的经验是行不通的。因此，他对那种根据已知事实用构造性的努力去发现真实定律的可能性感到绝望了，他确信，只有发现一个普遍的形式原理，才能得到可靠的结果。

当然，要使麦克斯韦理论与相对性原理协调起来，不变更传统的时间观念是根本不行的。正如爱因斯坦所说，“只要时间的绝对性或同时性的绝对性这条公理不知不觉地留在潜意识里，那么任何想要令人满意地澄清这个悖论的尝试，都是注定要失败的。清楚地认识这条公理以及它的任意性，实际上就意味着问题的解决。对于发现这个中心点所需要的批判思想，就我的情况来说，特别是阅读了戴维·休谟和恩斯特·马赫的哲学著作而得到决定性的进展。”自从突破了传统的时空观念之后，爱因斯坦高屋建瓴、势如破竹，只用了五、六周时间就一气呵成了相对论的第一篇论文。

爱因斯坦1905年6月完成的论文“论动体的电动力学”（发表在1905年9月的德国《物理学杂志》上）是物理学中具有划时代意义的历史文献。

这篇文献好象“光彩夺目的火箭，它们在黑暗的夜空突然划出一道道短促的但又十分强烈的光辉，照亮了广阔的未知领域。”（德布罗意语）这篇文献的“标题是很朴素的，但是在读它时我们立刻注意到这篇文章和同一类文章大不相同。它既没有文献的引证，也没有援引权威的著作，而不多的几个注脚也只是说明性的。文章是用简明朴素的语言写成的，即使对内容没有深刻的理解也能看懂其中的一大部分。……文章的陈述方式和行文的格式今天读起来还是那么生气勃勃。”（英费尔德语）

论文一开始，爱因斯坦就开门见山地提出了一个思想实验：当一个导体和磁铁相对运动时，在导体中产生的电流并不取决于两者那一个在运动。可是根据麦克斯韦理论，磁铁运动产生电场，而导体运动却不产生电场。爱因斯坦把这种不对称与企图证实地球相对于以太运动实验的失败联系起来，单刀直入地提出一种猜想：“绝对静止这个概念，不仅在力学中，而且在电动力学中也不符合现象的特性，倒是应当认为，凡是对力学方程适用的一切坐标系，对于上述电动力学和光学的定律也一样适用”。他接着便不加思索地说，“要把这个猜想（它的内容以后就称之为“相对性原理”）提升为

公设。”紧接着又引入了另一条在表面上与前者不同的公设，即光速不变原理：“光在空虚空间里总是以一确定的速度 c传播着，这速度同发射体的运动状态无关。”

由此，爱因斯坦便转入具体讨论，他在空间的各向同性和均匀性的假定下，给同时性下了可度量的定义，规定了校准时钟的三条逻辑性质。他接着论述了长度和时间的相对性，并得出结论：“我们不能给予同时性这个概念以任何绝对的意义；两个事件，从一个座标系看来是同时的，而从另一个相对于这个坐标系运动着的坐标系看来，它们就不能再被认为是同时的事件了。”他接着又基于两条公设推导出下述变换方程：

$$t' = \beta\ (t - \frac{v}{c^2} x)\ ,$$

$$x' = \beta\ (x - vt)\ ,\ y' = y,\ z' = z,$$

其中 $\beta = \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$ 。由变换方程，爱因斯坦方便地得到了长度收缩、时钟延缓的结论和新的速度合成法则。以上是“运动学部分”的梗概。

在“电动力学部分”中，爱因斯坦还是以变换方程为根据，导出了带撤系统中的麦克斯韦方程，

阐明了关于磁场中运动所产生的电动力的本性。这样，论文开头思想实验的不对称性以及一直争论不休的单极电机，现在也不成问题了。他从相对论给出了多普勒效应和光行差的说明，论述了光能和辐射压力的变换，导出电子运动的方程式。利用光能变换，爱因斯坦于同年9月在论文“物体的惯性同它所含的能量有关吗？”中推导出著名的质能关系式：$E=mc^2$，其中c是光速。爱因斯坦得出结论：物体放出E的辐射能与它的质量只减少 E/c^2 相当，因此物体的质量是它所含能量的量度。爱因斯坦预言，用那些能量变化很大的物体（例如镭盐）来验证这个结论，不是不可能成功的。这篇不到三页的论文是物理学中演绎法的最完美的典范。爱因斯坦仅仅通过对两列反方向平面光波的思想实验的细致分析，就轻而易举地解释了放射性元素放出巨大能量的原因，为人类揭示出取之不尽、用之不竭的新能源。

探索自然界的统一性是爱因斯坦一生所追求的目标。他说过：“从那些看来同直接可见的真理十分不同的各种复杂的现象中认识到它们的统一性，那是一种壮丽的感觉。”狭义相对论的建立，使爱因斯坦统一性思想旗开得胜。这一新理论成功地揭

示出时间与空间、物质和运动、能量和质量、动量和能量（在四维世界中，能量和动量结合成“能量-动量矢量”，动量是这个矢量的空间分量，能量则是它的时间分量）的统一性，把经典力学和经典电动力学统一起来。这是人类理性思维的杰作。

7.3 狭义相对论是一种崭新的理论

爱因斯坦的相对论论文一举清除了动体电动力学发展道路上的障碍，成功地提炼出新的基本概念，把人们的思想引向一个奇妙的新世界。但是，惠特克（E. T. Whittaker）却无视这一切，他在其名著《以太和电学的历史Ⅰ》（1953年）中就相对论的起源发表了一些不恰当的议论。该书第二章谈到这个问题时，其标题就是“彭加勒和洛伦兹的相对论”。继续读下去，爱因斯坦的名字只在一处出现，那里是这样写的：“爱因斯坦发表了一篇论文，把彭加勒和洛伦兹的相对性理论稍加扩充而重新提了出来。”我们在这里只简要地分析一下两种理论的主要差别，并顺便提一下洛伦兹和彭加勒对爱因斯坦相对论的态度。弄清这两个问题，惠特克的错误观点也就无地自容了。

洛伦兹和彭加勒两人的观点基本上是相同的，他们的理论（特别是洛伦兹的电子论）与爱因斯坦相对论的主要差别在于以下几点。

第一，两种理论的着眼点不同。前者认为力学处于一个优越的地位，电动力学是在经典力学的框架内发展起来的理论。后者却没有赋予力学以特殊地位。爱因斯坦认为，力学与电动力学是平权的，他关心的是二者之间关于运动相对性出现的不协调，他由此出发，力图找到一种新理论将二者统一起来，狭义相对论的基本公设正是力学和电磁学必须服从的共同原则。（顺便提一句，爱因斯坦的光量子论也是为了消除力学中具有分立实体的质点和电动力学中具有连续实体的场之间的不协调。）在当时，洛伦兹和其他同时代的物理学家对于物理学理论形式上的不协调却未做任何考虑。因此，爱因斯坦对不断涌现的新实验似乎没有多大兴趣。在1905年的论文中，他把那些知道的与不知道的、名目繁多的以太漂移实验轻轻地一笔带过。可是，几个思想实验对他来说似乎具有不可估量的吸引力，对于爱因斯坦来说，这也就足够了。

第二，两种理论的基础不同。前者把以太作为自己理论的基础。彭加勒把设想的新电动力学看作

是能够最终解决以太问题的理论，他还说过："除了电子和以太，就再也没有什么东西了。"洛伦兹从1875年完成博士论文直到他逝世前的讲话，都言必称以太，以太是他的电子论的基石，尽管他一度剥掉了以太的实体内容，但仍然保留下它绝对静止的性质。难怪一位作家把他的《电子论》巨著比作欧洲的一座辉煌的古堡，建造极为华丽，却仿佛有幽灵出没其中。爱因斯坦把以太幽灵彻底从相对论中清除出去，他的论文只有一处提及以太，那就是"光以太的引用将被证明是多余的"。

第三，两种理论的结构不同。前者归根结底是一种经验归纳理论，后者却是逻辑演绎的优美杰作。在彭加勒的心目中，相对性原理是一个经验定律，只要有一个反例，即可被证伪。当考夫曼1906年宣布，他的关于高速电子荷质比的实验既不与爱因斯坦理论一致，也不与洛伦兹理论符合时，这使彭加勒陷入忧虑之中。提到考夫曼的结论，彭加勒认为"它似乎表明相对性原理并不具有诱使我们给予它的精确无误的价值。"彭加勒虽然承认不同参照系的观察者会测量到相同的光速，但是这种一致和不变性却是洛伦兹-菲兹杰拉德收缩的补偿效应引起的。在彭加勒的心目中，存在着一个更受欢迎

的参照系，即静止以太的参照系，在这个唯一的参照系中，光速才真正是常数。洛伦兹为了使电子论与实验事实相一致，竟在1904年的论文中人为地引入了十一个特殊假设，显得十分牵强附会。而在相对论中，两条原理是作为公设而提出来的，加上同时性定义的四个特殊假设，以此为根据而推演出一套完整的理论，构成一个十分优美的逻辑演绎体系。正如爱因斯坦所说："这理论主要吸引人的地方在于逻辑上的完备性。从它推出的许多结论中，只要有一个被证明是错误的，它就必须被抛弃；要对它进行修改而不摧毁其整个结构，那似乎是不可能的。"对于考夫曼1906年的实验结果，爱因斯坦只是意味深长地保持沉默，他不相信自己推导出的理论会是错的。果然，在同年，布赫（Alfred Heinrich Bucherer，1863-1927）发表了支持洛伦兹-爱因斯坦观点的实验数据，该数据比考夫曼的度量具有较大的精确性。到1916年，有两位法国物理学家指出了考夫曼实验装置上的毛病。

第四，两种理论的本性不同。概括地说，前者是动力学理论，后者是运动学理论。洛伦兹的长度收缩是作为一个特殊假说而提出来的，是一种实际的物质过程，是由于物质粒子之间的作用力在运动

时发生变化，从而引起粒子之间距离的相应改变，因此这种收缩是绝对的。在相对论中，长度收缩是从坐标变换得出的必然结果，它仅仅是由于不同参照系的观察者关于同时性的判断不一致而引起的，物质的结构和性质甚至不必予以考虑。也就是说，长度收缩是测量过程本身的产物，它是相对的，两根互相做等速运动的棒那一个缩短了，对不同的参照系来说其结论是不同的。可是，洛伦兹却认为，收缩不仅与同时性判断无关，而且这种判断的差别是毫无意义的。关于以太漂移实验的否定结果，在前者看来，其动力学效应确实存在，只是由于相反效应的互相补偿、抵消，所以在表面上显示不出来。所谓光速不变，也是由于当地时间和真实时间的差别完全抵销了长度收缩效应，因而显示不出因运动而引起的光速变化。彭加勒对洛伦兹补偿理论的精神实质一直是满怀信心的。洛伦兹在1909年出版的《电子论》中也表明，他的理论与相对论的“主要差别”在于后者“使我们在诸如迈克耳孙、瑞利和布雷斯实验的否定结果中看到的不是相反效应的偶然补偿，而是一般的基本的原理的体现。”爱因斯坦在他的1905年的论文中就公开申明，“这里所要阐明的理论——象其他各种电动力学一样——是以

刚体的运动学为根据的，因为任何这种理论所讲的，都是关于刚体（坐标系）、时钟和电磁过程之间的关系。他接着指出，现存的理论对这种情况考虑不足，就是动体电动力学目前所必须克服的那些困难的根源。”他后来甚至说，他的理论是涉及到刚性棒、理想钟和光信号的理论，根本不涉及物质的具体结构和动力学效应问题。

第五，两种理论变换式的来源、形式和意义不同。洛伦兹的变换式是为了数学上的方便而先验地引入的。严格地说，它只是v/c 的一阶近似，且含有作为 v 的函数的系数 l。而相对论的变换式却是从两个公设直接推导出来的，它是一个一般形式。更为重要的是，前者仅仅是一种数学技巧，洛伦兹并不清楚它的物理意义；而后者却包含着时空观念重大变革的意义，彻底否定了绝对时间、绝对空间以及时间和空间毫不相干的传统观念。洛伦兹1927年谈到这一点时也承认：“因为必须变换时间，所以我引入了当地时间的概念，它在相互运动的不同坐标系中是不同的。但是我从未认为它与真实时间有任何联系。对我来说，真实时间仍由原来经典的绝对时间概念表示，它不依赖于参考特殊的坐标系。在我看来，仅存在一种真正的时间。那时，我把我

的时间变换仅看作为一个启发性的工作假设，所以相对论完全是爱因斯坦的工作。因此毫无疑问，即使所有前人在此领域的理论工作根本不曾做过，爱因斯坦也会想到它的。在这方面他的工作是与以前的各种理论无关的。”

由此观之，爱因斯坦的相对论与洛伦兹、彭加勒的理论有着质的不同。洛伦兹的电子论只不过是经典物理学的合理外延，爱因斯坦的相对论却是在抛弃经典理论框架后创立的新体系。洛伦兹煞费苦心地修补一条触礁的破木船，爱因斯坦却建造了一种新型的运输工具。

洛伦兹、彭加勒多年来一直受经典物理学理论的熏陶，他们又以自己的杰出贡献为经典物理学的神圣“庙堂”加砖添瓦，这使他们获得了不少赞誉。要使他们抛开自己的既得成果，那真是太难了，以致相对论的果子似乎被他们培育得即将成熟时，他们也不知道把它摘下来。不仅如此，甚至在爱因斯坦狭义相对论出现多年后，他们也迟迟不予接受。彭加勒对相对论长期保持缄默，他不可能没有看到爱因斯坦1905年的论文或它的法译文，因为他的德语极为娴熟，又经常向科学院成员作德国当前电动力学研究情况的报告。他恐怕认为相对论只

不过是洛伦兹理论微不足道的一部分，不是一种符合他所要求的简单性、适应性和自然性的理论。彭加勒在他的著作中还坚持以太观念，使用经典速度相加法则。到1909年，他还不愿说新力学已被证实了，甚至在他临死前一年（1911年），他在给爱因斯坦写的推荐信中还说爱因斯坦“所走的道路之中大多数是死胡同”。洛伦兹对相对论也很不理解。他后来虽然高度评价爱因斯坦的功绩，但对相对论却疑心重重，一直坚持自己的理论到生命的终结。他认为，物理学家可以根据自己习惯的思考方式来自由地选择理论，不管是以以太为基础的理论还是相对论。据玻恩说，他在洛伦兹逝世前看望洛伦兹时，洛伦兹对相对论的怀疑态度依然如故。

7.4 普朗克的庇护和闵可夫斯基的四维世界

刚刚诞生的相对论在当时确是“阳春白雪”，自然也就“和者盖寡”了，但它毕竟还是陆续遇到了知音人。普朗克是相对论的最早庇护人。他于1905年底在柏林大学的讨论会上作了评论相对论的讲演，这给他的助手劳厄以极为深刻的印象，以致劳

厄利用假期到瑞士的伯尔尼专门拜访爱因斯坦（后来，劳厄在1911年写了第一部宣传狭义相对论的著作《相对性原理》，加速了人们对爱因斯坦学说的理解）。1906年，普朗克认为考夫曼的结果不能看作是决定性的。他还分析了考夫曼的实验，认为那是靠不住的，提出应该慎重地再做一次实验。但是，普朗克也觉得爱因斯坦给出的电子运动方程根据不很充分（爱因斯坦奠基性的论文在这一点上是不正确的），他重新推导出该方程式，并进而得到了动能表达式。普朗克虽然高度评价了爱因斯坦的理论，认为它比洛伦兹理论更为普遍，可是他却看不到相对论对绝对时空观念进行了彻底的变革，也没有注意到相对论变换式的协变性，而且还错误地认为两种理论在本质上是一致的。直到1910年9月，他才清楚地认识到这些。

第一个意识到爱因斯坦新时空观的是他在苏黎世上学时的老师闵可夫斯基（Hermann Minkowski, 1864-1909）。由于这位学生在校时不注重正规课程的学习而喜欢独立思考，没有给老师留下好印象。以致闵可夫斯基在对相对论表示惊讶之余，不无感慨地说："唉，爱因斯坦！这就是那个经常不去听课的学生，我简直不相信他呀！"

1907年10月，闵可夫斯基在哥廷根数学协会说："以光的电磁理论为开端，在我们的时空观念中，一个彻底的变革似乎发生了。"第二年，在科隆举行的第八十届德国自然科学家与医生大会上，闵可夫斯基发表了题为"空间和时间"的热情洋溢的演说。他开宗明义地说："现在我要向你们提出的时空观是在实验物理学的土壤上产生的，其力量就在这里。这些观点是根本性的。从现在起，孤立的空间和孤立的时间注定要消失成为影子，只有两者的统一才能保持独立的存在。"闵可夫斯基认为，世界正如狭义相对论所描述的那样是四维平直时空，而事件是其中一些点，粒子的历史是由曲线（世界线）来表示的，惯性标架相应于跨越这个时空的笛卡儿坐标系。在不受外力的情况下，粒子运动的轨迹是短程线（在四维平直时空中为直线）。所谓洛伦兹变换，只不过是坐标系在四维空间中的转动，也相当于在时空中用不同的坐标系来重新标记事件，而两事件的四维距离不管在那个坐标系中都是一样的，它是一个不变量。闵可夫斯基把空间和时间统一体的客观的绝对存在称为"绝对世界假设"。照此看来，"相对论"似乎也可以叫做"绝对论"，因为它的前提是：物理定律是绝对的，不因参照系

的不同而变化。

闵可夫斯基以优美的数学形式，揭示出三维欧几里得几何同物理时空连续区之间的形式关系，富有极大的启发性。闵可夫斯基还说："在按照世界假设改造过的力学里，牛顿力学与现代电动力学之间令人不安的不协调就消失了。"他的这一论述逐渐消除了许多物理学家对爱因斯坦理论要旨和意义的误解，使他们认识到，相对论的基本假设是力学以及电动力学必须遵守的共同普遍原理。"这样，凭着纯粹数学与物理学之间预先建立的协调思想，甚至足以安慰那些对放弃旧观点抱有反感而感到痛苦的人们。"

闵可夫斯基的工作对于促进人们充分认识狭义相对论的意义和推动狭义相对论的传播，起到了应有的作用，它后来还成为通向广义相对论的一个必不可少的步骤。可是爱因斯坦起初对该讲演的反应并不热情，因为他感到有一种多余的、过分细致的数学形式掩盖了物理内容。不过，其他一些人还是在闵可夫斯基的"思想财富"的促动下做了一些工作。玻恩正好在闵可夫斯基逝世前为他做了几周助手，他沿着闵可夫斯基所开辟的这条路线发展了一些相对论力学概念。P·弗兰克也尝试把包括电动

力学和力学的相对论系统化。

7.5 保卫以太

要使一种变革传统观念的新理论或新思想为人们普遍接受，往往需要一个相当长的过程，这在科学史上是不乏其例的。就相对论而言，情况也是如此。按理说，“论动体的电动力学”一文中的理论论述并不十分深奥，数学运算更为简单，以致德国数学家希尔伯特 (David Hilbert) 说，哥廷根街上任何一个学童都知道这些数学知识。但是它发表后并没有潮水般的论文尾随其后，只是在过了大约四年光景才开始较多地引起人们的反应。其主要障碍恐怕在于长期束缚人们思想的机械自然观，尤其是传统的时空观念。

当时在德国（包括讲德语的国家），有人支持（如普朗克、闵可夫斯基、劳厄、玻恩等），也有人反对（考夫曼、亚伯拉罕等），但不管态度如何，人们还是认真对待相对论的。这样一来，就保证相对论可以受到检验、批评和阐述，一旦开始了这个过程，相对论的启发性威力就显示出来了。

在法国，情况迥然不同。在爱因斯坦1910年访

问法国之前，人们几乎没有提到过他，连研究动体电动力学的卓越人物彭加勒也是这样。甚至直到1924年，在法国任何一级学校中，居然没有介绍狭义相对论的情况。

在实用主义盛行的美国，相对论一开始也未被认真对待过，第一批研究者对爱因斯坦的纲领只有一个模糊的印象，美国的潮流甚至把相对论讥讽为异想天开的、荒诞无稽的理论。在1911年，美国科学协会主席、物理学家马吉(M·F·Magie)在演说中还激动地宣称："我相信，现在没有任何一个活人真的会断言，他能够想象出时间是速度的函数。也没有一个活人愿意下这样的赌注：他坚持自己的'现在'是另一个人的'将来'，或是其他人的'过去'。"马吉作出结论：爱因斯坦的理论不是根本性的，因为一个根本性的理论对所有的人来说都是可以理解的。爱因斯坦深为崇敬的迈克耳孙甚至至死都怀疑和厌恶相对论。

在以太传统浓厚的英国，否定以太存在的狭义相对论的传播也甚为迟缓。从1905年到1911年期间，英国人在相对论上几乎没有做多少工作（他们的文献仅占四个国家总文献数的10%），科学家似乎很难理解这个理论。尽管坎贝尔（N. R.

Campbell) 在1911年宣称，以太概念只是思想荒谬和混乱的根源，应当象“燃素”和“热质”一样，抛到腐朽发霉的垃圾堆去。但是这种言论是绝无仅有的，其他人对以太都深信不疑，他们甚至掀起了一场“保卫以太”的“运动”。除了前面多次提到的开耳芬外，洛奇1907年为他的再版的《电的现代观点》写序言时评论道：“这本书所阐述的东西就是电的以太理论。可以不加修饰地说，正如热是能量的形式或运动的形式一样，电也是以太的形式或以太的表现方式。”“以太存在的证据就好象空气存在的证据那样强烈和直接。”J·J·汤姆孙1909年在温伯尼的一次演说中宣称：“以太并不是思辨哲学家异想天开的创造，对我们来说，以太就象我们呼吸的空气一样必不可少。”“以太是电力和磁力的座位”，“是我们可以方便地贮存或提取能量的仓库。”直到1911年举行的“相对性原理”会议上，英国人对相对论的态度依然没有变化，没有一个人对以太表示怀疑。

从爱因斯坦1905年论文发表到1911年索耳未(Solvay)会议期间，全世界关于相对论的文献，99%以上都出自德、法、美、英四国。因此，上述情况是有代表性的。

7.6 广义相对论的建立和实验验证

如果说在狭义相对论诞生前还有先驱者的大量的工作的话，那么广义相对论可以说是爱因斯坦一人促成的。当时，狭义相对论本身既无问题，又与实验没有什么矛盾，爱因斯坦主要基于把相对性原理贯彻到底的信念和哲学、认识论的原则，一鼓作气完成了广义相对论。许多科学家当时对此觉得不可理解，例如普朗克就反问爱因斯坦："现在一切都能明白地解释了，你为什么又忙于另一个问题呢？"

爱因斯坦早就想到另一个有趣的问题：如果有人凑巧在一个自由下落的升降机里，那会发生什么现象呢？在"奥林比亚科学院"时期，他研读了马赫的《力学》，马赫关于惯性来源于宇宙遥远的物质的影响对爱因斯坦无疑是有启示的。爱因斯坦想：在牛顿力学中，为什么惯性系比其他坐标系都特殊呢？为什么速度是相对的而加速度是绝对的呢？

爱因斯坦在建立狭义相对论后，就试图着手建立引力的相对性理论。爱因斯坦起初想在狭义相对

论的框架内构造引力理论，但是存在着一个难以克服的困难：根据狭义相对论中的质能关系式，物理体系的惯性质量随其总能量的增加而增加，但是根据1890年厄缶（Roland Baron von Eötvös，1848—1919）精密的扭秤实验，物体的引力质量却与它的惯性质量相等，这样自由落体的加速度就应当与它的速度和内部状态密切相关，这显然与日常经验和该结论的前提相矛盾。爱因斯坦意识到，囿于狭义相对论的框架要找到满意的引力理论是毫无希望的。

伽利略早就发现了一个极其简单的实验事实，一切物体在引力场中都具有同一加速度，即物体的惯性质量同它的引力质量相等。但是，在牛顿力学中，这一事实并没有得到解释。多年来，人们都把这一司空见惯的事实看作是理所当然的，从未把它当作一个重要的问题认真思索过。对于这个不成问题的问题，爱因斯坦却把它当作一个值得研究的大问题，并看出了其中的问题之所在，这正是他高于一般人的地方。日本物理学史家广重彻说过："当科学家觉察到所研究的问题以前并不作为一个问题存在，这时科学变革就开始了。"看来，这话是有一定道理的。

爱因斯坦从惯性质量等于引力质量这一事实想到：如果在一个（空间范围很小的）引力场里，我们不是引进一个惯性系，而是引进一个相对于它作加速运动的参照系，那么事物就会象在没有引力的空间里那样行动。这就是所谓等效原理。爱因斯坦进而把相对性原理推广到加速系，这就是所谓的广义相对性原理。

1907年，爱因斯坦的兴趣转向推广狭义相对论。同年，他发表了论文"关于相对论原理和由此得出的结论"。在该文的第五部分，他就"相对性原理和引力"做了考察。他一开始就提出一个问题："是否可以设想，相对性运动原理对于相互作加速运动的参照系也仍然成立？"他还在这里明确地提出了等效原理："引力场同参照系的相当的加速度在物理学上完全等价"。他由此得出三个结论：在重力势为Φ的场中，时钟延缓$1+\frac{\Phi}{c^2}$倍；来自太阳表面的光的波长比地球上同类物质发出的光的波长大约大两百万分之一（引力红移）；光线经过引力场时，每厘米光程方向的变化为$\frac{r}{c^2}\sin\varphi$（φ为引力方向与光线方向的夹角，r为引力引起的加速

度）。爱因斯坦认为，所发现的等效原理是他“一生中最愉快的思想”。

爱因斯坦1907年的方案的细节仍旧是含糊的，等效原理只是帮助他讨论了引力对电磁场的个别效应。等效原理的几何化，引力场的数学特性，它的源以及场和源之间的关系即引力场方程都尚未得到。大约三年时间，爱因斯坦又醉心于新电子论的研究，想解决电子和电磁场的联接问题，但情况并不顺利，他于是又转向引力论。1911年6月，他完成了“关于引力对光传播的影响”的论文，该文试图把惯性质量与引力质量同等这一并非偶然的结果安插到一个更为一般的结构中去。但是，他没有完全取得成功，因为这时他还没有放弃牛顿的引力理论，只是在它上面加添了一些个别的新原理，拼凑起一个正确与错误的混合物，以致虽然很接近问题的答案但毕竟还不是。值得注意的是，爱因斯坦进一步根据等效原理说明了光在引力场中弯曲的必要性。他预言光线经过太阳附近要受到0.83″的偏转，对木星来说，只是此数值的1/100，他迫切希望天文学家能作出检验。1911年的这篇论文尽管还不成熟，但它毕竟在这一黑暗的领域内划出了一道亮光，成为爱因斯坦最终通向广义相对论的中途站。

爱因斯坦不能取得决定性突破的根本原因在于，要使人们从坐标必须具有直接的度规意义下解放出来，确实是一件不容易的事。直到1912年，当爱因斯坦意识到，用标准尺和理想钟测得的直接量度来表示坐标差是不可能的，合理的引力理论只能希望从推广相对性原理而得到，使得一切坐标系都是平权的，即客观真实的物理规律在任意坐标变换下形式不变（广义协变）——这时，他才接近了广义相对论的门槛；但是要打开大门，他还缺乏必要的数学工具。在上大学时，他由于没有认识到通向更深入的基本知识的道路是同最精密的数学方法联系在一起的，因而在一定程度上忽视了数学。在关键时刻，他的同学和朋友——数学家格罗斯曼（M. Grossmann）——帮了他的大忙，他们在里奇（G. Ricci）和勒维·契维塔（T. Levi-Civita）的绝对微分学以及黎曼（G. F. B. Riemann）几何中找到了合适的数学工具。就这样，爱因斯坦经过艰苦的摸索和无数的辛劳，终于在1913年和格罗斯曼完成了“广义相对论和引力理论纲要”的论文，其中物理部分由爱因斯坦执笔，数学部分由格罗斯曼执笔。广义相对论的大门终于打开了。

在这篇论文中，爱因斯坦引入了更广泛的坐标

系，使用了非线性坐标变换，推导出引力场中的质点运动方程。爱因斯坦的做法对理论带来了两个重大影响：一是更普遍的数学工具的使用，推动他向最终解决问题的目标迈进。二是采用更为一般的变换，引力场方程要用十六个度规分量（其中只有十个是独立的）表示，这十个度规表征了引力场中每一点的时空几何性质。两事件的间距是$ds=\sum_{\mu=1}^{4}\sum_{\nu=1}^{4} g_{\mu\nu}\,dx^{\mu}\,dx^{\nu}$，它是一个四阶对称张量。但是在这篇论文中，爱因斯坦还坚持，只有那些守恒定律在其中是正确的参照系才是可以采用的，他所得到的引力场方程和引力场存在时的电磁场运动方程还是不完整的。

1915年是爱因斯坦富有成果的一年。他先发表了一篇“用广义相对论解释水星近日点运动”的论文，不用任何特殊假设就成功地解释了水星在轨道上的长期旋转：每一百年大约转45″。他还纠正了1911年计算光线经过太阳附近弯曲的错误数值（由于未改变空间几何学而出了错），新结果比原先的值大一倍。这年11月，爱因斯坦终于完成了他的广义相对论的集大成论文——“广义相对论的基础”。

11月28日，他在写给索末菲的信中叙述道："上个月是我一生中最激动、最紧张的时期之一，当然也是收获最大的时期之一。""在对以前的理论结果和方法失掉一切信心之后，我清楚地看到，只有同一般的协变原理，即黎曼协变理论联系起来，才能得到令人满意的解决。""我感到高兴的是，不仅牛顿的理论作为第一近似值得出了，而且水星近日点运动作为第二近似值也得出了。关于太阳附近光的偏折，得到的总量是以前的两倍。"

"广义相对论的基础"发表于1916年，它是广义相对论的"标准版本"。在这里，爱因斯坦的思想已达到炉火纯青的地步，其行文如行云流水，看不到一点斧凿的痕迹。他根据思想实验和哲学思辨，阐述了引入等效原理、扩充相对性原理和使用协变性的缘由，他借助于黎曼曲率张量和克里斯多夫(Christoffel)符号表示出与泊松方程相类似的引力场方程。由场方程决定的度规，再加上其他运动方程，就确定了质点的历史。爱因斯坦所讲的理论，其范围极大，而概念却十分清晰，它对所有的参照系都同样适用。经典守恒定律不再是些定律而仅仅是些恒等式，它们失去了原有的意义。不再存在理论中所含的电磁力或弹性力那种意义的引力，

引力是以完全不同的方式出现的。狭义相对论给出的固定时空不见了；过去曾错误地认为物体通过引力来对其他物体的运动发生影响，而现在认为是物体影响其他物体在其中作自由运动的时空几何。在改变后的时空中的这种自由运动，就是曾被错误地认为是在原来时空中的受迫振动。现在，自然定律是一种涉及时空的几何命题，时空变成一种度规空间。引力场中的物理量与黎曼几何中相应的几何量建立了一一对应的关系，例如引力势$g_{\mu\nu}$正好是黎曼几何中的度规，由$g_{\mu\nu}$的导数组成的曲率张量$R_{\mu\nu}$表示物质存在引起时空的弯曲程度，引力场中的场强则是向量平移定律中的克里斯多夫符号$\Gamma^{\alpha}_{\mu\nu}$，物体在引力作用下的运动轨迹就是黎曼几何中的短程线。在这种情况下，欧几里得几何和牛顿引力理论仅仅是黎曼几何和广义相对论的一个特例。

广义相对论也有重要的哲学意义，诚如德布罗意所说，它“是熏陶物理学家们的精神的最好的手段”。广义相对论告诉我们，时空与物质密切相关，是运动着的物质的存在形式。爱因斯坦说：“空间-时间未必能被看作是一种可以离开物理实在的实际客体而独立存在的东西。物理客体不是在空

间之中，而是这些客体有着空间的广延。因此，‘空虚空间’这个概念就失去了它的意义。”而在狭义相对论中，时间-空间（作为一个惯性系）仅作用于一切物质客体，而这些物质客体却不对时间-空间给以反作用。因此，广义相对论便在更深一层意义上否定了牛顿的绝对时空观，揭示出“时空是物质存在的形式”（最近有人指出，时间可能是由更基本的量生成的次级量）。玻恩在1955年的一篇报告中说得好：“对于广义相对论的提出，我过去和现在都认为是人类认识大自然的最伟大的成果，它把哲学的深奥、物理学的直观和数学的技艺令人惊叹地结合在一起。”爱因斯坦“在黑暗中焦急地探索着的年代里，怀着热烈的向往，时而充满自信，时而精疲力竭，而最后终于看到了光明。”相对论（狭义相对论和广义相对论）的大厦全部建成了！

广义相对论运用了大量的黎曼几何、张量计算、绝对微分等艰深的数学知识，充满了深邃的哲学思辨，包含着崭新的物理内容，就是高级研究人员要弄懂它也非花大气力不可，一般人自不待言，更不用说哥廷根街上的学童了。对于爱因斯坦同时代的人来说，具有这些知识的人寥寥无几。但是，

由于广义相对论的预言不久得到了实验验证，所以还是引起了相当大的轰动。

广义相对论的实验证据当时有三个。其一是行星轨道的椭圆绕太阳的旋转，爱因斯坦在1915年和1916年的论文中已圆满地解释了水星近日点的进动，解开了这个长期使人困惑不解的疑团（水星近日点的进动是1859年被勒维烈发现的，勒维烈根据自己发现海王星的经验，误认为水星轨道内有一颗未知的行星或行星群存在）。其二是，由于引力作用，大质量的星球射到我们这里的光线，它的谱线移向光谱红端，即所谓光的引力频移。1924年，亚当斯（W. Adams）通过对天狼星伴星的观察，证实了这一预言，自1958年穆斯保尔（R.L. Mössbauer）效应发现以后，才开始在实验室中利用γ射线共振吸收来进行红向位移的实测。其三是引力场使光线弯曲，这一实验检验颇有戏剧性。

为了证实爱因斯坦在1911年论文中的预言，德国天文学家组成了一支考察队，于1914年前往俄国克里木半岛，想在日全食时进行观察。不幸第一次世界大战恰恰爆发，考察队人员全被俄国人当作战俘扣留了。“塞翁失马，安知非福”，这一不幸对广义相对论的验证倒是一件幸事。假使这次观察成功

的话，很可能会比爱因斯坦的预言值大一倍，因为他当时的计算有错误。

大战期间，交战国之间邮路中断，通过中立国荷兰天文学家的介绍，爱因斯坦1915年的论文传到英国，引起英国天文学家爱丁顿（Arthur Stanley Eddington, 1882-1944）的极大关注和浓厚兴趣。他在1918年发表文章指出，广义相对论引起了物理学、天文学和哲学的重大变革，这是一场影响深远的革命。大战刚刚结束的1919年，英国皇家天文学会立即派出了两支考察队，一支前往巴西北部的索布拉尔，一支由爱丁顿率领，前往西非几内亚湾的普林西比岛，在日全食时观察星光经过太阳的偏离。在普林西比观察所得的位移是 $1.61\pm0.30''$，索布拉尔的结果是 $1.98\pm0.12''$，两者在误差允许的范围内都与爱因斯坦预言的 $1.74''$ 相当符合。11月6日，这些结果被提交英国皇家学会与英国皇家天文学会联席会议。会议气氛迥异非凡，听众怀着强烈的兴趣，犹如欣赏一出希腊戏剧。主持会议的J．J．汤姆孙说："这是自牛顿以来，万有引力论的一项最重要成就"，"它不是发现一个外围岛屿，而是发现整个科学新思想的大陆。""爱因斯坦的预言，是人类思想的一大凯歌。"11月28日英国

的权威报刊《泰晤士报》以“科学的革命，宇宙引力的新理论”为题做了报道，立即震撼了欧洲乃至世界，引起了一股“相对论热”。爱因斯坦也随之名声大震，身价倍增，他的照片刊登在画报的封面，他的名字出现于报头标题，人们异口同声地称他为“二十世纪的牛顿”。爱因斯坦向来把荣誉视为累赘，他甚至觉得相对论热是“赶时髦”。爱因斯坦的声誉反倒招来了纳粹分子和排犹分子的忌恨，他们于1920年8月24日在柏林音乐厅召开了批判相对论的大会，极尽攻击谩骂之能事。爱因斯坦27日在《柏林日报》发表声明，对“反相对论公司”作了公开答复。他一针见血地指出，这个“杂七杂八的团体”的“动机并不是追求真理的愿望”。爱因斯坦也“厌恶为相对论大叫大嚷”，他表示：“夸张的言词使我感到肉麻”。劳厄1921年在他的介绍广义相对论的著作中说得好：“许多人赞扬，也有许多人反对。值得注意的是，无论在这一方或另一方，那些叫得最响的人几乎一点也不理解它。”

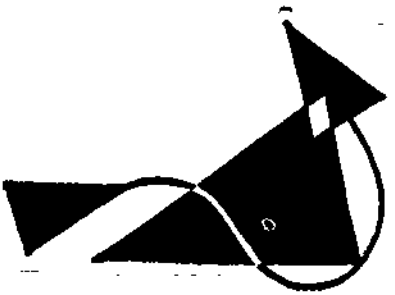
相对论被人们接受和理解是一个缓慢而艰难的过程，劳厄的经历很能说明问题。劳厄是相对论最早的信徒和倡导者，他1959年10月23日在写给玛格特·爱因斯坦（Margot Einstein）小姐的信中承

认，在爱因斯坦1905年的论文发表以后，“一种新境界缓慢地、但却是稳步地呈现在我的面前。我为此而耗费了巨大的精力，……特别是认识论上的障碍使我十分困惑。我觉得只是大约从1950年起，才排除了这些障碍。”劳厄在1960年2月为他的《物理学史》所写的“附录”中也说过：“广义相对论对我同许多其他人一样，比狭义相对论要伤脑筋得多；实际上我在1950年前后才真正掌握了广义相对论。”

爱因斯坦逝世（1955年）以后，特别是六十年代以来，不仅广义相对论的实验验证如雨后春笋，而且这一理论也成为相对论天体物理学、高能天体物理学和宇宙学的理论基础，展现出引人瞩目的前景。类星体、脉冲星、致密X射线源、3K宇宙微波背景辐射、黑洞、引力波等等的发现和探测，大爆炸理论和各种宇宙模型的提出就是很好的例证。目前，这一发展方兴未艾。

第八章

“自然无飞跃”古老格言的彻底破灭



8.1 黑体辐射和普朗克量子的引入

量子论是随着新世纪一起来到这个世界上的。1900年12月14日，在德国物理学会的一次会议上，普朗克宣读了他的论文“论正常光谱的能量分布定律的理论”，首次把一个崭新的概念——能量子——引入物理学。这一概念揭示出原子过程中的一种整体性的特点，它是一个完全超出经典物理学之外的概念，一举打破了“自然无飞跃”的古老格言。普朗克的发现把人们带进一个神秘莫测的未知

领域，并直接导致了量子力学的建立。

普朗克是从1878年开始对热辐问题发生兴趣的。按照劳厄后来的说法，热辐射理论自始至终“产生于德国”。十九世纪中叶，由于生产发展和社会需要，德国许多物理学家都致力于这个课题的研究。1859年，基尔霍夫和本生（Robert Wilhelm Bunsen，1811-1899）合作，通过实验得出如下结论：不管物体的种类如何，它的辐射能和吸收能之比都是相同的，而且仅仅是温度的函数。1879年，斯忒藩（Joseph Stefan，1835-1893）比较了许多实验结果后发现，热辐射的总能量与绝对温度的四次方成正比。他的学生玻耳兹曼1884年对此给出了严格的理论证明，这就是所谓的斯忒藩-玻耳兹曼定律。1893年，维恩（Wilhelm Wien，1864-1928）把热力学考察与多普勒原理结合起来，得到了位移定律，这是经典物理学所能做出的重大进展。到1895年，卢梅尔（Otto Lummer，1860-1925）和维恩创造了一个带有小孔的空腔，这小孔不影响空腔内部的辐射，它相当于一个黑体（能够吸收投射到它上面的全部辐射的物体），并且能透过小孔进行观察。他们用这个装置进行测定，确定了上述各个定律。从此，人们便有可能对黑体辐射进行定

量的研究了。

维恩不仅在实验上取得了重大进展，同时也尝试把辐射理论向前推进一步。1896年，他受到俄国人米亥耳孙（W. Michelson）工作（米亥耳孙在1887年没有得到可靠的结果）的启发，企图找到辐射总能量Q（ν，T）与频率ν及温度T的关系。维恩根据斯忒藩-玻耳兹曼定律、位移定律以及麦克斯韦速度分布律，并借助于一些特殊的假设，推导出一个分布律公式$Q(\nu, T) = \alpha\nu^3 \exp(-\beta\nu/T)$，这里α，β是常数。1899年，不少人进行了详细的测量，似乎大致证实了维恩分布式的正确性。但是，随着波长扩展到长波范围，理论与实验开始出现了偏差。特别是1900年发表的库尔鲍姆（Ferdinand Kurlbaum，1857-1927）和鲁本斯（Heinrich Rubens，1865-1922）的测量结果表明：在长波领域，维恩分布律的计算值与实验值显著不同。尽管维恩的重要结果并不完整，但却是通向量子论大门的最后阶梯。

英国物理学家瑞利在1900年批评维恩在推导分布公式的过程中引入了完全任意的假定。他认为维恩公式“从理论方面来看”，“似乎只不过是猜测而已”；“从实验方面来看”，“好象也相当难以

接受”。他想在更可靠的基础上导出分布式。瑞利证明，如果能量均分定理能够用于以太振动模型，那么黑体辐射分布就肯定与维恩公式不同。瑞利用处于一个立方体的空气的固有振动进行类比，求得空腔内电磁振动的固有频率，把能量均分定理用于各固有振动，于是得到分布公式$Q(\nu,T)\propto\nu^2T$。瑞利公式在长波范围与当时的实验相符，但在短波范围内却不一致。后来（1911年），这被荷兰莱顿大学物理学教授埃伦菲斯特（Paul Ehrenfest，1880–1933）称为“紫外灾难”。尤其使人不满意的是，它给出了无限大的总能量。为了防止积分发散，瑞利人为地给公式加上了一个毫无根据的指数因子$\exp(-\beta\nu/T)$，希望物理学家能用实验验证。瑞利以“关于辐射定律的评论”为题，把他的结果发表在1900年6月的《哲学杂志》上（1905年，金斯从电磁理论上更严格地导出了这个公式，故称瑞利-金斯公式）。无论是维恩公式，还是瑞利公式，都是能量均分定理的必然结果，也是经典力学和经典电动力学的必然结果。显然，黑体辐射所引起的反常现象暴露了经典理论的严重缺陷，它直接导致了普朗克量子论的诞生。

麦克斯·普朗克于1858年4月23日生于德国基

尔。早在童年时期，他就表现出相当突出的音乐才能，是优秀的钢琴手和风琴手。他基本上准备攻读数学或音乐，甚至还打算研究古典文学。1874年10月进入慕尼黑大学后，他很快又被物理学所吸引。他没有听从老师约利的劝告，还是选择物理学作为自己的专业。他的1879年的毕业论文是论述热力学第二定律的，后来研究化学平衡、气体离解、渗透压、热力学定律表述等问题。1897年，当普朗克把注意力转向黑体辐射问题的时候，他几乎已经四十岁了。使普朗克注意到黑体辐射问题的是基尔霍夫定律制约的分布定律的普遍特征。基尔霍夫和斯忒藩独立地证明了，在一个空腔中，如果腔壁保持在一定的温度，那么在热平衡状态下，辐射的本性与组成腔壁的材料性质无关。正如普朗克所说的，辐射的光谱分布"体现了某种绝对的东西，并且由于我总是把对于绝对的研究当作一切科学活动的最高目标，所以我热衷于进行工作。"

普朗克开始企图根据电磁理论给热力学第二定律奠定基础。他的设想如下：辐射空腔内谐振子的振动，其本身是符合能量守恒定律的，空腔内的辐射不可逆地达到平衡状态。可是，这种见解立即受到玻耳兹曼的批判，他认为谐振子的振动完全是可

逆的。普朗克虽然没有直接接受这一批评，但却放弃了电磁学方面的讨论，改而进行热力学的考察。

普朗克在后来的研究中继续处理辐射和谐振子之间的相互作用。他之所以选中谐振子，与其说它们被想象为物质的实际模型，倒不如说是平衡辐射与辐射作用的系统无关，并且谐振子在处理时也最为简单。1899年，普朗克通过定义能量u和熵S之间的关系 $S=-\frac{u}{\beta v}\ln\frac{u}{\alpha e v}$（α，β为常数，e为自然对数的底，v为振子的频率），得到了维恩1896年得到的辐射公式。他意识到，他定义熵作为能量函数的特殊表达式决定了维恩分布，他认为自己是根据位移定律和热力学第二定律的一致性面定义熵的，这似乎就是证明了维恩定律。他在5月18日向科学院提交的论文中说："我相信，由此必定能够得出结论，给辐射熵所下的定义以及与之一致的维恩能量分布律都是把熵增加原理用于辐射电磁理论的必然结果，这个定律可靠性的限度在这里应当是任意的，因为它与热力学第二定律的限度相一致。由于这一缘故，这个定律的实验验证自然具有较大的根本的兴趣。"这年底，正当他修改他11月7日交给《物理学杂志》的文章校样时，他所期待的"进一

步的实验验证”已由卢梅尔、普林斯海姆做出了。实验结果与维恩定律，也与他的理论断言不相符合，特别是在长波部分更是如此。普朗克只好给校样加了注释，说明了这一情况。但是，在1900年3月22日交给该杂志编辑部的文章中，他用稍为不同的方式又一次推演出了维恩公式，尽管没有充足的热力学理由。

在1900年10月前后，实验结果已变得十分明显了。鲁本斯和库尔鲍姆在一个更为宽广的温度范围内详细地研究了长波。他们毫无疑义地证明了，维恩分布律是不合适的。而且，在长波情况下，分布函数Q（ν，T）变得正比于绝对温度T了。10月19日，他们向德国物理学会报告了这一结果。

在报告的前几天，普朗克就获悉了这些结果，经过一番考虑，他把自己先前工作的正确成分与新的实验发现结合起来，对低频和高频加以适当限制，从而凑出了一个新的分布律公式 $Q(\nu, T) = \frac{A\nu^3}{\exp(B\nu/T) - 1}$，这里A和B均为常数。就在同一个报告会上，普朗克特意作了追加演说，宣布了自己的新分布律。当晚，这个新分布律就得到证实。普朗克后来回忆说：“就在第二天早晨，我的

同事鲁本斯来访。他告诉我，会议结束后，他当夜就用他的测量结果检验这个公式，发现在每一点上都极为满意地一致。……后来的测量也一再证实了我的辐射公式——所用的测量方法越好，公式就显得越准确。”

普朗克在选择他的分布公式时，一个关键之点在于，他采纳了下述实验结果：在低频下，分布函数正比于绝对温度。普朗克在1900年10月的通信及两个月之后的论文中唯独没有提及瑞利1900年6月的分布公式。普朗克不会不知道瑞利的短文，他大概没有看到瑞利的观点，或者即使看到了，他也许不会认为它十分重要。因为瑞利主要是依据麦克斯韦、玻耳兹曼的统计力学得到他的公式的，而统计力学研究的是具有大量粒子系统的平均行为或可几行为，这种几率的考虑违背了普朗克追求“绝对”的思想，因此他经常表白他对统计力学研究的不信任态度，自然也就对瑞利的短文不大在意了。由此观之，说普朗克是在维恩公式和瑞利公式二者之间进行“内插”从而得到他的分布公式，这一传说恐怕值得商榷。

普朗克当然不满意自己凑出来的公式，他企图从理论上推导出这个公式。当他着手进行这一工作

时，他快快不乐地发现，自己不得不采取玻耳兹曼的统计方法。普朗克在1920年获得诺贝尔奖金时谈到了当时的情况："但是，即使辐射公式绝对精确的可靠性被认可，只要它仅仅具有由侥幸的直觉所揭示出来的规律的地位，它就不可能表达出比形式意义更多的过程。由于这种原因，正是在我系统阐述这个定律的时候，我开始全力以赴地赋予它以真实的物理意义。这种追求自动地驱使我去研究熵和几率的解释——换句话说，去追随玻耳兹曼所开创的思想路线。""这是我一生最为紧张的工作，若干星期之后，暗夜隐退了，意想不到的胜景开始呈现出来。"

从1900年10月19日到12月14日虽则只有不到两个月时间，普朗克却做出了意义深远的惊人发现。为了推导出辐射公式，他承认了玻耳兹曼的观点，并且把它用于熵和几率的关系之中。但是他并未全盘照搬，而是在两个关键之处有所突破。第一，他引入了一个与玻耳兹曼不同的几率公式。当他规定系统的熵S_N与组成该系统的N个谐振子所具有的总能量U_N的几率W的对数成正比，即$S_N = k\ln W + Const.$时（其中k为玻耳兹曼常数），他说："按照我的观点，这种规定基本上相当于几率的定义；

因为在构造辐射的电磁理论的假设方面，我们完全没有出发点，所以只好用定义谈论几率。作为这种定义的理由有二：首先是它的简洁性，其次是和气体运动论密切的类似性。”普朗克在这里没有理解几率W的“模型”，这一点在任何意义上与玻耳兹曼的几率毫无相似之处。第二，玻耳兹曼为了实现他的组合过程，利用了“能量元”（energe element）ε，但他在适当的步骤又令$\varepsilon \to 0$而取了极限，得到他的统计分布律。显然，他利用ε，只不过是使计算方便的数学技巧而已。在玻耳兹曼那里，能量依然是一个连续量。普朗克虽然也同样引入了能量元ε，但他并没有令$\varepsilon \to 0$，而是根据热力学的理由，令$\varepsilon = h\nu$（其中h是一个普适常数，后称普朗克常数）。普朗克认为，谐振子的能量只能是$h\nu$的整数倍。他最终得到的分布公式是$u = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{k\nu-1}}}$并计算出k和h的值，这些结果发表在1901年的《物理学杂志》上。其中h是普朗克常数，它现在的值是6.626×10^{-27}尔格·秒。事实上，普朗克在1899年5月推导维恩公式时，就注意到这个物理常数的意义了。

普朗克的高明之处正在于他大胆引入了量子概念。正如他1929年所说："如果要把量子论这一假说中最富有特性的观念也用一句话表达出来，我们可以说它的中心内容在于介绍一个新的和普遍的恒量——元作用量子。这一恒量就象实在世界中新传来的神秘信息一样，在每一种量度中老是出现，而且不断为其自身的要求占得一席地位。但另一方面，它和物理学所提供的传统宇宙观又极不和谐，终于打破了旧观念的框架。"

然而，普朗克当时似乎并不了解自己新发现的深远意义，用他后来的话来说，这不过是"孤注一掷的行动"，"实际上并没有对它想得太多"。其他物理学家一开始也没有意识到普朗克的量子假说引起了一场革命。在四年多时间内，只有瑞利、金斯、洛伦兹三人对该问题进行过认真的讨论，但他们并不承认普朗克的工作。瑞利和金斯都反对量子概念，金斯批判普朗克的两点恰恰是前述的普朗克对玻耳兹曼的背离，洛伦兹在1908年的罗马讲演中还表示难以接受普朗克的理论。普朗克的量子概念之所以被忽视，除传统观念的束缚外，还有另外两个原因。一是物质结构方面一系列激动人心的发现吸引了物理学家。二是普朗克的论文有意识地运

用类似于玻耳兹曼的思想进行论述，因而延缓了一些人对它的承认。因为玻耳兹曼是唯能论的坚决反对者，当时在欧洲，唯能论的声势还是相当强大的。不仅如此，就连普朗克本人在迈出了关键性的一步后便开始畏葸不前，甚至出现了两次大倒退。

8.2 爱因斯坦的光量子和固体比热理论

正当普朗克犹豫彷徨之际，爱因斯坦敏锐地看到量子概念隐含的普遍意义。爱因斯坦于1905年3月写出了三篇论文中的头一篇（其他两篇是关于布朗运动和狭义相对论的）："关于光的产生和转化的一个启发性的观点"。在这篇论文中，爱因斯坦把普朗克针对谐振子能量所作的量子假说大胆引进光辐射的研究中去。

在光的理论方面，从十七世纪以来就交织着牛顿的微粒说和惠更斯的波动说的斗争。这两种理论就象鲨鱼和老虎一样，它们各自在自己的活动范围内称王称霸，而在对方的活动领域内却一筹莫展。但是，由于牛顿的权威影响，微粒说在十九世纪之前一直独占鳌头。十九世纪初，由于托马斯·扬和菲涅耳的推动，波动说获得了新生，得到了许多实

验支持，并且在麦克斯韦理论中找到了它的最终表现形式，大有彻底排除微粒说之势。正如爱因斯坦所说："用连续空间函数来运算的光的波动论在描述纯粹的光学现象时，已被证明是十分卓越的，似乎很难用别的理论来替换。"但是，爱因斯坦没有完全迎合时髦的理论，他看到了它的缺陷："不应当忘记，光学观测都同时间平均值有关，而不是同瞬时值有关，而且尽管衍射、反射、折射、色散等理论完全为实验所证实，但仍可以设想，当人们把用连续空间函数进行运算的光的理论应用到光的产生和转化的现象上去时，这个理论会导致和经验相矛盾。"为了解决这个矛盾，他大胆地把普朗克的量子假说加以合理地推广，提出了光的量子论："从点光源发出的光束的能量在传播中不是连续分布在越来越大的空间之中，而是由个数有限的、局限在空间各点的能量子所组成，这些能量子能够运动，但不能再分割，而只能整个地吸收或产生出来。"

爱因斯坦认为，光是由能量为 $h\nu$ 的量子所组成，他称这种量子为"光量子"。1926年，美国化学家刘易斯(G. H. Lewis)把它叫做"光子"。爱因斯坦用光量子十分简单地解释了斯托克斯萤光定则、光电效应和气体光致电离。说来也有趣，打

破麦克斯韦电磁波理论缺口的光电效应早在1887年就被赫兹注意到了。当时，他在用实验证实麦克斯韦电磁波时无意中观察到，如果用紫外线照射接收电磁波的装置，就容易产生电火花。接着，斯托列托夫（А.Г.Столетов）从1888年到1900年用精确的实验方法研究了光电效应，勒纳德于1902年也进行了这一工作。勒纳德是赫兹原来的助手，后来沦为希特勒的狂热信徒，反相对论的干将。他们二人宣布了光电效应的几个实验规律：由于紫外线照射，从金属表面逸出的电子能量从光频率的一个下限值出发，随着光频率的增加而增加，电子的能量和光的强度无关，光的强度只决定单位时间放出电子的数目，而且即使光强度非常微弱，电子的产生也不需要显著的时间（至多为10^{-9}秒的数量级）。他们看到，按照光的能量是连续分布这种通常的见解，是无法说明上述事实的。爱因斯坦用他的光量子理论方便地说明了这个现象："能量子钻进了物体的表面层，并且它的能量至少有一部分转换为电子的动能。"爱因斯坦推导出电子动能和光频率之间的基本关系式$\frac{1}{2}mv^2 = h\nu - P$（与原始论文符号不尽相同，P是电子的逸出功）。他用这个公式计

算出的数据与勒纳德的实验大体相符。

几乎所有老一辈的物理学家都反对光量子论。普朗克直到1913年都对此感到难以容忍，比较年轻的玻尔甚至到1924年还拒不承认光量子论。后来，密立根花了十年功夫去检验爱因斯坦的光电效应公式。他起初并不相信光量子论，实验结果同他的希望相反，他在1915年不得不断言这个理论的正确性，并由该公式精确地测定了h的值。

有人说，爱因斯坦是为了解释光电效应而提出光量子的。实际上并不完全是这样。爱因斯坦主要是从原理上的考察入手的，这从他的论文也能看得出来。他在论文开头就申明："在物理学家关于气体或其他有重物体所形成的理论观念同麦克斯韦关于所谓空虚空间中的电磁过程的理论之间，有着深刻的形式上的分歧。"为了消除分立的质点同连续的场之间的形式上的分歧，爱因斯坦提出光量子论，赋予光以波粒二象性，把光的微粒说和波动说在一个更高的基础上统一起来，并以此解释了有关实验事实，光电效应仅是其中之一。这是爱因斯坦的一贯做法，狭义和广义相对论的提出也是遵循同样的思想路线。

紧接着在1906年3月，爱因斯坦又写了"论光

的产生和吸收”的论文，论述了光量子和普朗克公式的关系，并利用光量子假说推导出伏打效应和光电散射之间的关系。爱因斯坦清楚光量子假说这个启发性观点的意义，可是普朗克却长期怀疑爱因斯坦极有价值的创见。事实上，普朗克只是把谐振子能量的量子化看作是达到辐射定律的手段，他的确没有抛弃更多的现成理论结构，只是在绝望中背弃了它。如果可能的话，他甚至会避开这一根本性的步骤。相反地，爱因斯坦却是在实验证实了辐射定律的前提下肯定量子的存在的。在普朗克把量子化看作是得到辐射定律充分条件的地方，爱因斯坦却坚决主张，辐射定律要把量子存在作为一种必然结果。对于爱因斯坦来说，量子并不表示振子的特殊性质，而是显示了辐射结构的本质方面。爱因斯坦对他的朋友埃伦菲斯特所说的“紫外灾难”的意义了如指掌，这个时期，他从未停止对普朗克辐射公式的探讨和思考，继续研究能够代替经典理论的新线索。1906年11月，爱因斯坦完成了题为“普朗克的辐射理论和比热理论”的论文。在这篇论文中，他证明普朗克的量子论导致了对热分子运动论的修正，并由此得到了固体的热学行为和光学行为的某种联系。

爱因斯坦根据振子平均能量的推导重新得到了普朗克分布公式，他进而指出："虽然我们过去一直设想分子的运动是同样严格遵循着我们的感官〔所感觉到的〕世界中物体运动所遵循的那种规律（我们基本上只要添补一个完全可逆性假设），可是我们现在需要作这样的假设：能够参与物质和辐射的能量交换的、以确定的频率振荡着的离子，它们能够采取的种种状态，少于我们〔日常〕经验中物体可能采取的各种状态。我们必须假设，能量的交换机制是这样的：基元实体的能量只能取0，hν，2hν等值。"对爱因斯坦来说，这并非问题的全部，他继续写道："如果辐射理论接触到了事物的核心，那么我们必须期望在其他热学理论领域中也可以发现现代分子运动论和经验之间的矛盾，这些矛盾可以用这里所采取的方法来消除。"

爱因斯坦在固体比热这个问题中发现了矛盾，他通过修正用热的分子理论来探讨其他周期振荡实体的理论设法消除这一矛盾。作为固体热运动的简单模型，考虑在平衡位置附近作正弦振荡的原子（在这里仅仅为了方便，他假定固体中的所有原子均以相同的频率振荡）。根据经典能量均分定理，每克当量物质对比热的贡献是$c = 3R = 5.94$，它与

温度和物质种类无关，这与杜隆（Pierre Louis Dulong, 1785-1838）和珀替（Alexis Thérèse Petit, 1791-1820）1818年的实验结果相符。可是，稍为考察一下就会遇到两个困难：其一是碳、硼、硅等一些元素的比热远小于5.94；其二是根据固体光学性质的研究，必须给某些化合物固体原子以更多的自由度，因此其热容量要大于5.94。根据前面对普朗克公式的推导，爱因斯坦得到一个原子的平均能量是 $\overline{E}=\frac{3R}{N}\frac{\beta\nu}{e^{\beta\nu/T}-1}$，把该式对温度微分，可得每克当量这种原子所组成的固体对比热的贡献 $5.94\frac{e^{\beta\nu/T}(\beta\nu/T)^2}{(e^{\beta\nu/T}-1)^2}$。由此可见，固体比热并不是与温度无关的。爱因斯坦以比热为纵轴，以 $T/\beta\nu$ 为横轴作出曲线，以此说明两个困难被新理论消除了。

更为引人注目的是，爱因斯坦的比热公式暗示出：在足够低的温度下，所有固体的比热必然要趋近于0。他并且指出，在许多情形下，能够从红外吸收的测量来确定振荡频率。几年后，他还提出了另一种利用频率与固体弹性常数的关系来确定频率的方法。爱因斯坦的比热理论成功地解释了一些长

期存在的困难问题，预言了一些新规律，并且在晶体的热、光和弹性性质之间建立起意想不到的关系。这一切，对唤起物理学家对量子论的兴趣起了非常重要的作用。当时，正值科学家对低温下的比热感兴趣之际，能斯特（Walther Nernst，1864-1941）和他的合作者首先在液态空气，后来在液氢温度下测量了固体的比热，在所有本质方面均与爱因斯坦的理论预言一致。

从1907年关于比热的论文发表后的四年半时间内，爱因斯坦在这个问题上再没有投入过多的精力，他把自己的注意力转向他认为更基本的问题——辐射的量子结构和他的相对论的深刻含义。他当时没有看到固体比热理论能够指出通向新基础的道路，他关心的中心问题依然是辐射的本质。1909年在萨耳斯堡，他参加了德国自然科学家协会举行的大会，第一次会见了普朗克，并在会上作了“论我们关于辐射的本质和结构的观点的发展”的报告。他论证说，未来的光学理论“可以认为是光的波动论和发射论的某种综合”。爱因斯坦的预言基于他对普朗克黑体分布律所隐含的内容的不断探索，他把辐射表现出的这种波粒二象性看作是物理学需要新的统一基础的明证。自从1905年他为处理

辐射问题而提出光粒子说这一启发性的建议以来，他对光量子在新基本理论中的看法有了进一步的发展。爱因斯坦设想了一种图象：光量子作为奇点而出现，就象静电场的出现遵循电子理论一样，光的电磁场的出现是同奇点相联系的，电磁场的全部能量，可以看作是定域于这个奇点。每个奇点都围绕着一个力场，许多这样的力场彼此叠加，就形成一个类似于现代电磁场的波动场。这样，就不能认为光的波粒二象性是根本不相容的。不幸的是，对于这种图象的研究，他并没有深入地进行下去。它本来应该与狭义相对论一致，但是爱因斯坦却把它看成只不过是一种普遍的形式上的原则，就象热力学定律一样，它不能给出辐射和物质结构的线索。在1908年到1911年间，他曾把洛伦兹的电子论作为出发点之一，在这个问题上倾注了大量的心血，但取得的成效却并不理想。此后，他感到自己的脑筋暂时不可能完成这样一件事，便搁下这项全力以赴从事的工作，转而投身到广义相对论的研究中去了。但是，他并没有完全放弃对量子论的兴趣，还继续思考了一些问题。

8.3 第一届索耳未会议

在量子论的发展史中，1911年10月30日召开的第一届索耳未会议起了举足轻重的作用。索耳未是比利时的化学实业家，他因为发明了制造纯碱的新流程而发了大财，于是不惜耗费数百万钱财支持各种有价值的事业。索耳未对物理学的基本问题有着特殊的业余兴趣，他委托能斯特筹备这次会议。在1911年6月向欧洲二十五位最著名的科学家发出的邀请信中，能斯特这样描述了当时物理学的状况："显然，作为物质经典分子运动论基础的原理正处于新的发展之中。这一理论的系统发展一方面导致了与所有实验结果相抵触的辐射公式；另一方面，从同一理论推导出的关于比热问题的结论……同样地又被许多测量所驳倒。尤其是普朗克和爱因斯坦已经证明，如果人们在平衡位置振动的分子和原子方面提出某种限制(能量子原则)，那么矛盾即可消除；但是这种解释却又如此远离我们迄今使用的运动方程，以致它的出现必然地、毋庸置疑地要使我们目前的基础理论经受一个广泛的革新。"在普朗克看来，在此之前的一些时候，除了爱因斯坦、洛伦兹

和拉摩等为数不多的几个人而外，大多数人还没有感觉到，物理学理论的不完善状态“对于每一个真正的理论家来说都是不能容忍的”。出于这种担心，他曾对能斯特提出的召开一次会议的试探性建议采取了不够积极的反应。

索耳未会议按预定计划在布鲁塞尔召开了。会议的中心议题是“辐射理论和量子”，二十一位科学家紧张而热烈地讨论了五天。正式论文安排了从金斯企图不借助于量子思想来解释经典理论到爱因斯坦论辐射量子结构的绝对不可避免性。在这次会议上，爱因斯坦发表了关于比热问题目前状况的评论。佩兰（Jean Baptiste Perrin，1870-1942）就分子实在性方面的布朗运动实验研究做了介绍。朗之万（Paul Langevin，1872-1946）围绕磁理论的现状阐述了己见。普朗克报告了他的辐射公式，论述了必要的理论变更，但是他又否认光量子的看法，并提出谐振子连续地吸收电磁能，只是在放出电磁能时是分立的，从他1900年的观点后退了一步。不过，他在引入的假定中却包含着这样一种值得注意的观念：原子放出的光是一种非因果的、几率的过程。作为会议主席的洛伦兹以“能量均分定理对于辐射的应用”为题作了报告，他指出瑞利

公式无非是从经典力学和经典电磁学推导出来的，它与经验不符，并且具有发散的弱点。他得出结论说，经典物理学对这个问题无能为力。会议上的争论通常是很尖锐的，彭加勒在批判金斯的企图时说："那不是物理学的任务，人们不应当引入与所解释的现象一样多的常数。"爱因斯坦也抱怨普朗克利用玻耳兹曼的关系有点不大妥当，普朗克的做法使这一关系丧失了任何物理内容。彭加勒在最后的总结讨论中指出："新的研究所提出的问题不仅涉及到力学的各种原理，我想也许还与传统的自然定律密切相关。"他进而反问道："难道所有的自然定律都能够用微分方程的形式写出来吗？"

洛伦兹是物理学界乐于公认的领袖，他以其独到的端庄无华行使领导，同时机智而周密地驾驭辩论，使会议取得了圆满成功。与会者无不赞许他的渊博的知识、机敏的智慧和透辟地概括纷纭议论的能力，尤其钦佩他那无与伦比的语言技巧。第一届索耳未会议把物理学家的注意力引向量子论的争端上来。现在，普勒克的担心可以消除了，与会者已经清楚地看到经典物理学基础的严重裂痕，深感解决这个问题是一项刻不容缓的任务，并对量子假设的不可避免性及其重要意义有了更为深刻的认识。

在会议行将结束时，一位有头脑的观察家发表了自己的感想，他说：假如以往人们对这种朝气蓬勃的新思想也许表现得有点胆怯的话，那么"似乎可以肯定，从现在起我们将不得不把分立的、跳跃式变化着的某种东西引入我们的物理学和化学思想中去，就是在几年之前，我们还根本没有这些新概念。"朗之万也评论道：量子论的发现者完全没有预料到象光吸收频率和比热这些不同现象间的关系，我们必须承认量子论不可思议的威力。这次会议的间接影响也是无法估量的，只要了解一下下述两件事实，就会明白这次会议的深远意义。莫里斯·德布罗意（Maurice de Broglie）是会议的秘书，他的弟弟、十九岁的路易·德布罗意会后读到了准备发表的会议讨论初稿。路易·德布罗意后来写道："我以极大的热忱拜读了会议所讨论的问题，十年前普朗克首次引入了量子概念，我决定把自己的整个青春和全部精力都投入到揭示神秘量子的真实本性中去。"果然，到1924年，他提出了物质波的新概念。还有一件事是这样的：卢瑟福会后返回曼彻斯特，玻尔在他那儿停留了一段时间。玻尔聆听了卢瑟福热情洋溢的叙述，获悉了会议进展情况的第一手材料，受到极大的启示和鼓舞。他于1913年提出了

原子结构的量子论，使人们对量子的认识深化了一步。

8.4 玻尔的原子结构理论

玻尔于1885年10月7日出生在哥本哈根一个富裕的知识分子家庭。除受正规教育外，家庭的熏陶和鼓励也为他的天赋的充分发展和知识视野的不断扩大创造了良好的条件。他对其他方面，其中包括体育运动，也都表示出强烈的兴趣。在哥本哈根大学读书时，他就作为一个有深刻理解力的研究者而崭露头角。1906年，他通过细心的实验和严密的推理，精确地利用振动射流测定了水的表面张力，从而获得科学院颁发的金质奖章。当时，他还是一个学生。不过，玻尔有一个最大的特点，也许就是他的思维和理解力的缓慢，他看电影时常常跟不上情节的发展，这一点也表现在科学讨论中。当玻尔成名后，常有物理学家拜访他，就量子论的某个复杂问题发表宏论。别人往往都听明白了，唯独玻尔迷离惝恍，大家只好向他解释来访者的要点，玻尔渐渐懂了。但是，他的理解却往往与来访者的意见完全不同，结果玻尔的理解是对的，来访者的意见却

错了。

玻尔这位年轻的丹麦物理学家是偶然走向原子物理学的道路上来的。他1911年的博士论文研究的是“金属电子论探讨”。在玻尔从事新的工作之前，人们已经获得了许多关于原子结构方面的知识。卢瑟福为了解释他所发现的α粒子大角度散射的实验，于1911年提出了原子的核结构模型。但是，核模型却遇到了两个严重的困难：其一是它不具有稳定性，这在前面已经讲过；其二是沿轨道运动的电子应该发出连续光谱，而实际情况并非如此。人们很早就发现，自由原子发出由不连续的谱线组成的光谱。1885年，巴耳末(Johann Jakob Balmer, 1825-1898) 发现，能用一个经验公式表示当时已知的十四条氢谱线。后来里德伯 (Johannes Robert Rydberg, 1854-1919) 把它用波长的倒数表示出来，于是巴耳末公式变为：$\frac{1}{\lambda}=R_H\left(\frac{1}{2^2}-\frac{1}{n^2}\right)$，$n=3,\ 4,\ 5,\ \cdots\cdots$，这里的$R_H$后来称为里德伯常数。巴耳末公式暗示出还可能存在其他系列的氢谱线，他正确地推断上述公式可以推广为$\frac{1}{\lambda}=R_H\left(\frac{1}{m^2}-\frac{1}{n^2}\right)$，其中m取固定的正整数，而n取

所有满足$n \geqslant m+1$的正整数。在二十世纪初，在远紫外区和红外区都发现了许多氢谱线，巴耳末的广义公式在宽广的光谱范围内被证实了。氢以外的其他元素的光谱也观察到是分立的线系。在1913年之前，已有一大批各种精确的光谱数据，其中不少已找出经验公式，但是对这一切还没有恰当的理论解释。

在哥本哈根完成了学业以后，玻尔来到英国剑桥，希望能在J·J·汤姆孙的指导下继续他的电子理论工作。汤姆孙虽然友好地接待了玻尔，但是汤姆孙对该课题已失去了兴趣，对玻尔的论文也不重视，以致该论文无法付印。这种挫折并未使玻尔灰心丧气，他一有时机就到曼彻斯特拜卢瑟福为师。卢瑟福凭着他的敏锐的判断力，很快就觉察到这位腼腆、谦虚的年轻人的天才，他对玻尔关怀备至。自1912年3月到7月，玻尔在这里全力以赴，发奋工作，终于为自己在物理学上取得伟大成就奠定了坚实的基础。

起初，卢瑟福分配给他的研究课题由于缺乏镭放射物而中断，在等待材料期间，他研究了一篇α粒子吸收的文章，发现其中忽略了α粒子与原子中电子的束缚力。这年6月，他把自己电子论的题目

搁置起来，完全致力于原子模型的研究。6月12日，他在写给哥哥的信中谈到他为什么要改变原先的计划："可能我已找到了原子结构的一个小的颗粒。……如果我是正确的，那将不是一个可能性的征兆，而多半是一个小的实体。已经完全抛弃的一个小东西的信息，我又从α粒子的吸收得到……，你可以想象我是多么热切希望很快地结束这项工作。我已经停止进实验室好多天了。"玻尔所谓的"一个小东西的信息"，很可能是指核原子在力学上是不稳定的发现。汤姆孙和剑桥大学正由于这个原因而拒绝核模型，而玻尔反倒欢迎核模型，因为这说明原子里的电子需要一种非力学的力来稳定。

玻尔发觉了隐藏在卢瑟福核模型中的深刻含义，他分析了电子和原子核（这个词是在玻尔1913年的论文中首先使用的）的显著差别后指出，物质的化学性质由核外的电子决定，质量和放射能则在于原子核。玻尔拟定以卢瑟福的原子模型为基础，并引入能量子，从而达到汤姆孙所设想的目标——用原子结构说明元素周期律和化学性质。

玻尔在1912年7月离开曼彻斯特，他对进一步探索所展现出的广阔前景充满着幻想和希望。同年秋天，他在哥本哈根任教，同时着手总结他在曼彻

斯特的学术思想。1913年，玻尔的思想突然转向原子辐射问题。这年2月初，他向他的朋友、著名的光谱学家汉森（H.M.Hansen）介绍自己的原子结构时询问：用它能说明光谱吗？玻尔想，光谱这东西太复杂了，大概不会成为弄清原子结构的钥匙，不必为此而枉费心机。对此，汉森反驳道：从巴耳末公式看，光谱未必是复杂的。玻尔得知，光谱学家已经从这些杂乱无章的谱线里发现出规律性，这使他惊叹不已。汉森的一席话使玻尔顿开茅塞，他事后曾说："我一看到巴耳末公式，就全都清楚了。"的确，这一公式的思路太明显了，能由此推导出对辐射过程的量子化描述，他相信这是正确的，尽管这意味着与经典思想实行彻底的决裂。年轻时，玻尔就喜欢听他父亲和朋友们讨论深奥的哲学问题，往往一听就是几个小时。当他读了一位丹麦作家写的阐述黑格尔辩证法的小册子后，他对哲学产生了浓厚的兴趣。正是年轻时获得的辩证思想，使玻尔摆脱了传统观念的束缚。以此为转机，玻尔文思如泉，他只用一个多月时间就完成了论文的初稿，最后在1913年4月初定稿。

玻尔一组论文（共三篇）的题目是"论原子和分子的构成"，在这里他提出了自己的原子结构模

型。玻尔假定，电子绕原子核做圆形轨道运动。在一定的轨道上运动的电子具有一定的能量，称为定态，在定态下运动的电子并不辐射能量。原子可以有许多定态，其中能量最低的定态叫基态。原子中的电子从一个定态跃迁到另一个定态时，会放出或吸收辐射能，其频率ν由初态和终态之间的能量差来决定：$h\nu = E_1 - E_2$。最后，玻尔还提出了下述量子化规则。原子可能存在的各种定态是不连续的（即量子化的），电子运动的角动量P必须等于$h/2\pi$的整数倍，即$P = nh/2\pi$，$n = 1, 2, 3, \cdots\cdots$，其中n是主量子数。这个规则在1923年被玻尔称之为对应原理。根据这些假定，玻尔计算出氢原子中处于各定态的电子的轨道半径和能量，圆满地解释了巴耳末-里德伯经验公式。特别是从这些假定推导出的用其他已知常数表示的氢原子里德伯常数，通过计算，其值与实验符合得很好，这本身就是玻尔理论正确性的证明。

玻尔的理论能够方便地说明原子物理学、光谱学和化学中的一些实验事实，因而很快地受到学术界的欢迎。他的论文的头一篇发表于1913年6月，在同年9月召开的英国科学促进协会年度大会上，它的价值被公认了，量子论成为大会物理组的中心

议题。金斯也改变了自己原先的态度，他在总结报告中断定，作用量子的采用是势在必行的，他称赞玻尔理论对线光谱规律的说明最巧妙、最有启发性、最有说服力。但是J·J·汤姆孙却不欣赏玻尔的工作，他认为任意规定一个量子化条件，并赋予其动力学意义，这不是物理学，而只是掩盖无知。因此，他在会上声称，大概没有一件能比以正统的力学方式得到原子理论的结果更让人放心了。这种恢复旧观念的努力当然阻挡不住量子论发展的强大洪流。第一次世界大战结束后，大学刚刚复课，汤姆孙承认自己跟不上形势，从而辞去卡文迪许实验室主任的职务，并推荐卢瑟福为继任人。但是汤姆孙并没有放弃物理学，也没有放弃对量子论的异议。

玻尔的原子结构理论是普朗克的能量量子化思想、爱因斯坦的辐射量子理论和卢瑟福的有核原子模型的混合体，电子的轨道概念还纯粹是一种经典概念。因此，玻尔的理论是半量子化的，它虽然能有效地用于单电子原子，并对碱金属原子也近似适用，但是毕竟不能应付中性氦原子的实验事实，更不必说比较复杂的原子了。它尤其对下述问题无法作出回答：为什么原子的能量是量子化的？为什么电子会有稳定的运动状态？为什么电子在定态时不

辐射能量？尽管如此，玻尔的原子结构理论对量子论的发展来说还是一个重要的里程碑。在玻尔之前，量子论涉及的仅仅是与辐射有关的问题，玻尔理论表明，即使对于原子的行为，能量子也具有不可估量的意义。在当时，玻尔理论代表着量子论发展的主流，对量子力学的形成起了巨大的推动作用。爱因斯坦在二十年代初这样评论道：玻尔的“思辨所大胆选择的假设基础，很快地成为原子物理学的主要支柱。从玻尔作出最初发现以来，虽然还不到十年，但是这个由他提出主要轮廓及大部分内容的体系，却已经完全支配着物理学和化学，以致所有以前的体系在专家们看来都已经过时了。”

这个时期，物理学家，特别是那些后起之秀都把研究目标集中在玻尔理论提出的许多问题上。1913年和1914年，莫塞莱(Henry Gwyn Jeffereys Moseley，1887-1915) 在曼彻斯特做出了出色的工作，开辟了X射线光谱学这一新领域。斯塔克 (Johannes Stark，1874-1957) 发现氢光谱线在电场中发生分裂。J。弗兰克 (James Franck，1882-1964) 和G·赫兹 (Gustav Hertz，1887-1975) 发现电子被许多气体原子阶梯式减速，从轰击的电子传到受打击的原子上的能量仅发生在取决

于原子的一定的分立量上。这些实验为研究系统的动力学行为提供了新的途径，不久玻尔对这些情况亲自作了概括说明。还有一些人沿着玻尔的路线，在解释光谱学的实验结果中，从理论上不断丰富了玻尔原子结构理论。为了解释氢光谱的双线现象（斯塔克效应），1915年索末菲提出了电子运动的椭园形轨道概念，引进了角量子数k = 1，2，……n，后来改为轨道量子数l = k − 1。其次，他考虑到电子的质量随电子运动速率的变化，经过计算得到，玻尔理论中氢原子的一个定态会分裂为若干能量稍有不同的定态，即原先的一条谱线分裂为若干条谱线，这种所谓的“精细结构”与实验观察完全一致。1916年，索末菲又根据原子光谱在磁场中分裂的事实，提出了磁量子数m = 0，±1，±2，……±（k − 1），以表示电子的角动量在磁场中的可能取向。到1925年，高德斯密特（Samuel Goudsmit）和乌伦贝克（G • E • Uhlenbeck）为了解释碱金属光谱的精细结构，提出了电子自旋的概念，于是又增加了自旋量子数$s = \pm \frac{1}{2}$。同年，泡利提出了不相容原理，即在同一原子内，两个电子不能同处于一个量子态。

8.5 对应原理

在本世纪的头十多年，量子论经普朗克、爱因斯坦、玻尔等人之手，已为自己的存在争得了合法的立足之地。但是，它无论在内容和形式上，还或多或少地保留着经典理论的痕迹，在某些方面还是由一些假设、原理、规定和计算拼凑起来的大杂烩，没有形成一个严密的理论体系。在量子论发展史上，这往往被称为旧量子论或早期量子论。量子论后来遵循着两条独立的路线发展着：一条由爱因斯坦关于辐射的波粒二象性思想出发，经过德布罗意的物质波概念，到达薛定谔的波动力学；另一条由玻尔的对应原理开始，导致了海森伯等人的矩阵力学的建立。

玻尔1913年的工作开辟了一个广阔的新天地，实验工作蓬勃开展，理论研究也急剧变化。玻尔那种幽居独思的方式已为一种相互协作、共同探讨的作风所代替。1916年，第一个投身到玻尔那里的是一位年轻的荷兰人克拉姆斯（Hendrik Anthony Kramers，1894-1952），在以后的十年里，他成为玻尔的不知疲倦的助手和有才华的合作者。在此

期间，还有许多学者来到玻尔那里工作，其中有年轻的克莱因（O.Klein）、泡利、海森伯和狄喇克（P.A.M.Dirac，1902- ）等人。玻尔也经常和慕尼黑的索末菲、哥廷根的玻恩、约尔丹和莱比锡的海森伯等人为首的研究团体保持着经常的密切联系。这样，在二十年代，以玻尔为中心，以哥本哈根理论物理研究所和德国的几个城市为基地，聚集了一支强大的科学研究队伍，形成了世界上力量最雄厚的理论物理学派——哥本哈根学派。当时，哥本哈根成为“原子物理学的首都”和“量子物理学家的麦加”*，哥本哈根学派一直在量子力学的创立和发展中起着主导作用，因此有人称其为正统学派，而玻尔则是这个学派公认的领袖。物理学家、被誉为原子弹之父的奥本海默（R.Oppenheimer）后来在回顾量子力学的历史时，曾高度地评价了玻尔的历史功绩。他说：“量子力学的建立不是哪一个人的功绩，而是来自不同国度的许多科学家共同努力的结果。然而从开始到结束，玻尔那种充满创造性的深刻思想和敏锐的、长于批判的精神，始终引导着、制约着事业的前进，使之深入，直到最后完

* 麦加（Mecca）是沙特阿拉伯一首邑，为伊斯兰教创始人穆罕默德诞生之地，因而成为伊斯兰教徒朝拜的圣地。

成。”但是，玻尔的卓越才干也具有明显的局限性，他在凭借直观构造概念方面是无与伦比的，而在数学方法的运用上却比自己的同行和学生逊色得多。玻尔本人对这一点也直言不讳，他十分形象地说：他对物理学的兴趣与其说是数学家的兴趣，还不如说是工匠和哲学家的兴趣。

前面已经涉及到玻尔模型的固有缺陷和面临困难。最严重的问题也许在于，电子在这个模型中由量子条件规定面作周期运动，因而它应以一定的频率绕核旋转，然而这个频率绝不会在观察中出现，我们绝不会看到它。我们看到的是一些不同的频率，每一频率决定于从一个定态跃迁到另一个定态的能量差。后来，索末菲虽然引入角量子数和磁量子数，说明了氢光谱的精细结构、斯塔克效应和塞曼效应，可是这个条件本身的根据并不充分，也看不到把它推广到非周期系统的方法。用当时的理论即使能够计算谱线的频率，却不能给出它的偏离和强度。为了弥补这些缺点，出现了埃伦菲斯特的绝热假说和玻尔的对应原理，特别是后者，为矩阵力学的建立提供了指导原则。

对应原理的萌芽在1913年已经破土而出了，但明确形成则是在1918年。把量子论看成经典理论合

理推广的企图导致了对应原理的陈述。玻尔认为，在极大量子数的态间跃迁的情况下，经典描述也应该是有效的。如果把原子当作多周期系统来分析，它的运动状态就可以用傅立叶级数描述为一系列谐振子运动的迭加，每一个振子都以一个确定的频率或它的整数倍的频率振动，其振辐也是一定的。确实可以证实，极大量子数的态间跃迁频率与经典频率之间存在着大致的倍数关系，这个因子就是两个态间的量子数之差。因此，在大量子数的情况下，可以直接用经典的振辐来计算量子跃迁的强度。玻尔进一步把这些看法推广到多自由度的情况。对应原理的实质在于，从前的经典规律和新的量子规律之间存在着某种对应关系，从对应关系看，前一类定律是后一类定律的极限或个别情况。在附加上一定的条件后，二者之间就可以互相“转换”。1919年，克拉姆斯将对应原理用来处理斯塔克效应，其结果与观察一致，从而证实了它的有效性。但是，它也不能对一切问题都作出直接的回答，它只是提供了线索，为了作出具体的解答，还必须加上种种限制和猜测。值得注意的是，它不仅为建立矩阵力学的数学结构起了前导作用，而且在认识论上也具有巨大的意义。

8.6 海森伯的矩阵力学

矩阵力学也许可以看作是用定量的关系来代替定性的对应原理的一个成功的尝试，它是海森伯在玻恩和约尔丹的协助下完成的。海森伯从1920年起在慕尼黑大学就学于索末菲，攻读理论物理专业，1923年得到博士学位后到哥廷根大学玻恩手下任助教，从1924年开始，他到哥本哈根理论物理研究所，在玻尔指导下从事研究工作。海森伯一向认为，要解决新的物理学问题，需要大胆的思维。他说过："在每一个崭新的认识阶段，我们永远应该以哥伦布为榜样，他勇于离开他已熟悉的世界，怀着近乎狂热的希望到大洋彼岸找到了新的大陆。"

1924年，在哥廷根的一次讨论会上，海森伯曾经强调指出，把量子论的困难单单归诸于辐射与力学体系间的相互作用是不正确的。他认为力学必须加以改造，必须用某种量子力学（量子力学这个词大概是玻恩在1924年的一篇论文中首次使用的）来代替，方能提供理解原子现象的基础。玻恩当时也注意到，量子论中代表跃迁特征的量对应于古典理论中振辐的平方，并发现了这种量的乘法规则，他

想这也许是通向新力学的途径。海森伯也常参加玻恩的讨论会，玻恩的思想无疑对他有启发作用。其实，海森伯先前就热衷于把量子论推广到谐振子之外，围绕着非谐振子问题进行了考虑。他还借助于一条重要的方法论原则，即可观察性原则。这个原则要求，在理论上应该抛弃那些原则上不可观测的量，而直接采用可观测的量。海森伯事后曾这样谈到他那时的想法："经典力学除了给出原子结构的某些定性的图景以外，显然不可能给出更多的东西，至于电子的周期性轨道，可能根本就不存在。直接观测到的不过是分立的定态能量和谱线强度，也许还有相应的振幅与位相，但绝不是电子的轨道。唯一的出路是建立新型的力学，其中分立的定态概念可以是基本的，而电子轨道概念看来是应当抛弃的。这个新的力学还应当能给出强度的定量估计，也就是光子辐射的几率变化，因此在设想的新的图景中可以期望出现统计的因素。"

1925年春夏之间，海森伯从哥本哈根返回哥廷根。同年6月，他因患枯草热病到海利戈兰特去疗养，在这期间，在他的头脑中孕育着一个极为大胆的新思想。疗养结束后，他立即完成了一篇具有历史意义的论文"关于运动学和力学关系的量子论的

重新解释”。在论文中，海森伯抛弃了经典的电子轨道概念及其有关的经典运动学量，而代之以可观测到的频率和强度这些光学量。而在海森伯之前，人们所做的只是把玻尔轨道进行傅立叶分析，玻尔轨道的那些系数当然同实验毫无关系。海森伯用一些同实验有比较密切关系的量来代替这些系数，这些量同辐射跃迁有关，它们每一个都涉及到两个状态。当仔细考察其中每一个都同两个状态相联系的量时，他发现这些量是不可对易的。本来，这种不可对易的代数学就是矩阵运算，但是当时海森伯并不了解它。他曾对玻尔说：“现在有学问的哥廷根数学家们这样起劲地谈论什么厄密矩阵，而我却甚至连什么是矩阵都不知道。”

海森伯感到自己无法将问题再推进一步，便于1925年7月将他的论文原稿交给他的老师玻恩，要玻恩决定是否应当发表，并问该论文是否有点用处。玻恩觉得这篇论文似乎显得“神秘”，但无论如何也是正确的。玻恩后来回忆当时的情景说：“我不顾它的神秘的外表，而坚定地认为它是正确的，这就似乎表明当时我已经发现，海森伯的不寻常的演算实际上不过是人所共知的矩阵演算，而且我已经看出，海森伯对惯常的量子条件所做的新表述，表

示了矩阵方程的对角线元素 $pq-qp=\frac{h}{2\pi i}$。因此，对于其余的元素，$pq-qp$这个量必定是零。"

玻恩和他的助手约尔丹讨论了海森伯的论文，并引入了矩阵运算。他们三人于1925年11月合著论文，建立了矩阵力学的理论体系。这样一来，经典力学中的坐标q和动量p便被厄密矩阵所取代。这些矩阵如此选择，以便使得$p_iq_j-q_ip_i=\frac{hI}{2\pi i}\sigma_{ij}$，这里I是单位矩阵。由这些矩阵可以构造出哈密顿矩阵$H(q_i, p_i)$。当这个哈密顿矩阵经过酉变换而成为对角形时，对角线上的元素就是该系统的可能量。

就在同年的8、9月间，刚刚进入物理学前沿的英国青年狄喇克也看到了海森伯论文的校样，他起初并未引起重视，因为它与哈密顿理论有点不一致。十多天后重读这篇论文时，他突然顿悟到，它包含着打开原子世界秘密的钥匙。但是，他不满意海森伯的数学表述，企图利用一种数学工具把海森伯的矩阵力学纳入哈密顿体系。10月的一个星期天，狄喇克独自到乡下散步，但他的脑子总甩不掉那个对易于。他突然想到泊松括号，这是法国数学物理学家泊松（S.D.Poisson，1781-1840）在1809年

为研究行星运动而创造的，它是经典力学最有力的分析工具之一，能用极简明的形式表示经典力学的基本方程。于是，他把对易子和泊松括号联系起来，提供了处理量子论中力学量的偏微分方法。狄喇克于1925年11月完成了论文，轻轻扫去了横在玻恩、海森伯和约尔丹三人面前的巨大障碍，一举构造出量子力学的数学体系，使量子力学大大前进了一步。

8 7 德布罗意的物质波和薛定谔的波动力学

与此同时，量子论也沿着另一条路线不断发展着。爱因斯坦自从1905年在处理辐射时提出光量子这一启发性的建议以来，一直把辐射表现出的波粒二象性看作是物理学需要新的统一基础的明证。1916年，爱因斯坦在完成广义相对论后又重新转入到辐射问题上来。这时，玻尔的原子结构理论以及索末菲等人对它的推广开辟了一个富有成果的新领域，爱因斯坦的工作也多少受到这些思想的影响。就在这年，他发表了题为“关于辐射的量子理论”的论文，根据玻尔量子跃迁的概念推导出普朗克辐射公式，并提出了受激辐射理论，奠定了激光技术

的基础。爱因斯坦的这项工作，综合了早期量子论的成就，把普朗克、爱因斯坦、玻尔三人的工作合为一个完整的体系。贯穿这项工作中的统计思想在量子力学的建立中得到充分的体现和发展。在这一时期，爱因斯坦认为自己的最重要的贡献就是对量子定向性质的论证。原子发射或吸收每一个频率为ν的量子时，除了交换$E=h\nu$的能量外，必定在确定的方向上携带有$P=\frac{h\nu}{c}$的动量。爱因斯坦的这一预言1923年被康普顿（Arthur Holly Compton，1892-1962）关于X射线的散射所证实。康普顿实验显示出，不仅光子的能量，而且光子的动量也起了作用。但是，爱因斯坦的理论还不能使光的愈益明显的粒子性和波动性协调起来，而且在原子放出或吸收光子的作用过程中，其持续时间和方向也完全出于偶然。尽管埃伦菲斯特等人进行了彻底的研究，仍不能用粒子说解释光的衍射。布拉格（William Lawrence Bragg，1890-1971）在评述光理论的这种进退维谷的处境时说：物理学家恐怕得在星期一、三、五使用光的古典理论，在星期二、四、六使用光的量子学说。

莫里斯·德布罗意是法国的实验物理学家，他

是康普顿实验粒子解释的热情支持者。他的弟弟路易·德布罗意由于深受他的影响，从历史学改行转向物理学。可是，对于路易·德布罗意来说，研究历史从来都不是可有可无的活动，特别是研究自己从事的那门科学的历史。历史的意义在他看来并非是偶然提出的附加要求，而是他全部研究工作的基本要求。他的许多研究工作都是直接从历史观点出发的，他的物质波思想归根到底也是通过思考光学发展史而产生的。路易·德布罗意从爱因斯坦光的波粒二象性思想中受到很大的启示。他想，辐射具有粒子性，而物质粒子为什么不可以具有波动性呢？长期以来，在光学上，与波动的研究方法相比，过于忽视粒子的研究方法了。而在物质粒子的理论上，人们却反其道而行之，太忽视波动的图象了。他在晚年回忆当时的情景说："经过长期的孤寂的思索和遐想之后，在1923年我蓦然想到，爱因斯坦在1905年所作出的发现应当加以推广，使它扩展到包括一切物质粒子，尤其是电子。"

1923年9、10月间，德布罗意一连发表了三篇短文。1924年，他向巴黎大学理学院提交了题为"关于量子理论的研究"的博士论文，首次提出了物质波的概念。德布罗意认为，辐射的波粒二象性同

样适用于物质。正如辐射的一个量子有一个波伴随着控制它的运动那样，一定量的物质将有相应的物质波控制它的运动。物质的波动性和粒子性在数量关系上的联系也适合于爱因斯坦的公式。德布罗意建议，应该把玻尔理论中的量子条件解释为关于物质波的陈述。由于几何学上的理由，环绕核转动的波只是驻波，而轨道的波长必定是德布罗意波长的整数倍，从而把量子条件和波粒二象性联系起来。他指出，自由粒子新的动力学和旧的动力学之间的关系，完全同波动光学和几何光学之间的关系一样。他还预言，即使是电子束，通过十分小的孔洞时，恐怕也能看到衍射现象。不出所料，后来在1927年，戴维孙 (Clinton Joseph Davisson, 1881-1958) 和革末 (Lester Halbert Germer, 1896-1971) 利用镍单晶证实了德布罗意波的存在。J·J·汤姆孙之子G·P·汤姆孙 (George Paget Thomson, 1892-1975) 使电子束穿过薄金属箔，也在同年发现了衍射现象。有趣的是，老子因确证电子是粒子，于1906年获得诺贝尔奖金；儿子 G·P·汤姆孙因确证电子是波动，于1937年获得诺贝尔奖金。到第二年，即1928年，鲁普(F.Rupp) 利用划有条纹的衍射光栅，成功地得到了电子波的衍射图样。

1924年11月25日，德布罗意在索邦审定委员会上答辩了他的博士论文。在此之前，学位评审人朗之万把论文内容告诉了爱因斯坦。尽管德布罗意的结论所根据的仅仅是形式上的类比，是一个极为大胆的假设，但爱因斯坦一眼就看到了它的重要性。他读完论文副本后赞赏道："厚帷幔的一角被德布罗意揭开了。"爱因斯坦之所以这样评价德布罗意的物质波，是因为他看到了它与自己关于理想气体新理论之间的关系。在此稍前（1924年夏），爱因斯坦收到印度达卡大学玻色（S.N. Bose, 1894-1974）的一篇稿件，其中用所谓玻色统计处理光子而导出了普朗克公式。爱因斯坦看中了这篇文章，亲自把它译成德文予以发表，同时着手研究将玻色的方法推广到理想气体的统计力学，计算了服从该统计（后称玻色-爱因斯坦统计）的理想气体的涨落。在这一计算中，他找到了德布罗意物质波的一个证据，他确信德布罗意的物质波概念不仅仅是类推。沿着这条路线走到底的是薛定谔。

薛定谔于1887年8月12日生于奥地利的维也纳。他在中学是一个好学生，可是不注重主课（拉丁文和希腊文），偏爱数学和物理。1910年，他在维也纳大学获博士学位。第一次世界大战中，他作

为一名军官在炮兵部队服役，仍然没有中断物理学研究。后来，他主要研究的是有关热力学的统计理论问题。在1925年，他也曾涉及到量子统计问题。当他从爱因斯坦在普鲁士科学院的一篇报告（“单原子理想气体的量子理论讨论Ⅰ”）中得知德布罗意的物质波概念时，立即引起了他的极大关注。他承认，爱因斯坦指出了一个基本的新途径，但是他企图以一种较为满意的形式来改扮它，想把它从玻色统计学里分离出来。1925年底，他在“关于爱因斯坦的气体理论”一文中认为，根据德布罗意、爱因斯坦的波动理论，运动的粒子只不过是宇宙基质中波动辐射上的泡沫而已。薛定谔在晚年谈到波动力学起源时说：“是德布罗意的论文以及爱因斯坦的虽然简短、但却是高瞻远瞩的评述促成了我的理论。”爱因斯坦的评述把德布罗意的思想和服从玻色-爱因斯坦统计的气体的性质联系起来了。

有一次，薛定谔给一个讨论班讲德布罗意的物质波理论，德拜（Peter Debye，1884-1956）提出了一个人人都会问及的问题：如果电子是波，那么电子所服从的波动方程又是什么呢？薛定谔当时难以立即回答，事后他想，原子应当被当作某种振荡体系来处理，它应该具有能级，用数学物理学中解决

其他问题所流行的方法，这些能级就会作为这个振荡体系的本征值而显示出来。沿着这条路线思考，他被引向描述粒子状态的波动方程。薛定谔是从1925年11月开始猜测到这一点的，他在12月27日写给慕尼黑《物理学年鉴》杂志编辑的信中说："我相信，我可以给出一种振动体系，……它导至氢原子的能级作为它的本征频率。"可是，薛定谔在这里给出的是相对论性波动方程，由于当时没有考虑电子的自旋，结果与实验不一致。由于这一挫折，使薛定谔大为失望，曾一度认为他的方法基本上是错误的。其实，薛定谔最初的探索途径完全正确，问题在于应用相对论性方程必须有它自身的大量证据，但是在当时，这样的证据并不充分。

经过短暂的中断之后，薛定谔继续使用原先的方法，这次他改而处理的是非相对论性的电子，终于在1926年1月达到预期的目的。波动力学从此诞生了。薛定谔的一组研究成果共有四篇论文，陆续刊登在德国的《物理学年鉴》上，总题目是"作为本征值问题的量子化"。薛定谔在他的第二篇论文中与其说对波动方程作了一个简短的推导，倒不如说类比更为恰当。在上世纪，哈密顿把几何光学的方法引进力学，得到了哈密顿-雅科毕微分方程。从

哈密顿的工作中，薛定谔找到了质点力学和几何光学之间的类似性。薛定谔想，光既有粒子性，又有波动性，描述它的既有几何光学，又有波动光学，并且几何光学是波动光学的极限。物质粒子也具有波粒二象性，要描述它也应该既有质点力学，也有波动力学。既然质点力学与几何光学相类似，波动力学也许与波动光学相类似。而且，正如在光学中的情况一样，质点力学也应该是波动力学的特例。就这样，薛定谔应用哈密顿理论，从“一切——总之一切——都同时是粒子和波”的观点出发，从而得到了波动方程 $i\hbar\frac{\partial\Psi}{\partial t}=H\Psi$，其中$\Psi$为波函数，H为哈密顿算符，$\hbar=\frac{h}{2\pi}$。于是，量子论所面临的问题就变为求解薛定谔方程的本征值的问题。薛定谔方程经典性的美，引起了不少物理学家的赞赏。早在1926年4月，普朗克在收到第一篇奠基性论文的单行本后写信给薛定谔：“我正在象一个好奇的儿童听解他久久苦思的谜语那样，聚精会神地拜读您的论文，并为在我眼前展现的美而感到高兴。”薛定谔后来撰写了一本发行量很大的小册子《生命是什么？》，大胆地将量子物理学的研究成

果用于生命现象的研究，对分子生物学的创立起了奠基作用。他也对认识论极感兴趣，海森伯甚至有点言过其实地说他是一个“百分之百的哲学思想家”。

现在，沿着两条不同的认识路线，海森伯和薛定谔先后得到了两种形式迥然不同的理论体系——矩阵力学和波动力学。矩阵力学在数学运算中运用的是不可交换的量和以前罕见的计算规则，并且藐视任何图象解释。它是一种代数方法，从所观察的光谱线的分立性着手，强调不连续的成分。尽管它弃绝空间和时间的经典描述，但从根本上说，它的基本概念还是粒子。而波动力学，运用的却是人们熟知的微分方程这种数学工具，它类似于经典流体力学，并且示意出一种容易形象化的表示。它是一种分析方法，从推广了的经典运动定律着手，强调连续性成分，而且它的基本概念是波动。

正由于这种数学形式上的不同和物理概念上的差异，所以两位创始人开始时互不服气。海森伯在抨击薛定谔时说，他越想越觉得波动力学丑陋不堪。薛定谔也反唇相讥，说矩阵力学运用排斥一切直观、极难理解的超越代数的方法，即使不令人生厌，起码也显出吓人的样子。爱因斯坦虽然对矩阵

力学感到新奇，但却持怀疑态度，他明显倾向于波动力学。他在1926年写给玻恩的信中谈到矩阵力学时说："有一种内在的声音告诉我，它还不是那真实的东西。"他称赞薛定谔说："我相信您以那些量子条件的公式取得了决定性的进展，正象我同样相信海森伯、玻恩的路子出了毛病一样。"他在同年褒扬薛定谔的"文章的思想显示了真正的天才"，而批评海森伯、狄喇克理论"闻不到真理的气味"。

奇怪的是，矩阵力学和波动力学总是给出相同的结果，因此薛定谔预料，两种理论大概有某种内在联系。1926年3月，他把波动函数展开为正交系，根据对应关系进行替换，成功地证明了两者在数学上是等价的：矩阵由薛定谔的本征函数构成，反之亦然。与此同时，泡利也独立地进行了同等性的证明。可是，由于薛定谔的波动力学比较容易掌握，加之当时物理学家已习惯于偏微分方程的求解，对矩阵运算尚且陌生，因此都乐于用薛定谔的方法处理问题。1926年底，狄喇克和约尔丹发明了一种变换理论，用算符表示有关物理量，指出了由一种表示过渡到另一种表示的方法。这样一来，矩阵力学和波动力学合二而一，形成了非相对论性量子力学的理论体系。

8.8 狄喇克的综合

量子力学的发展是令人鼓舞的，量子力学的成就是令人满意的，初露头角的狄喇克，对它怀有极为强烈的兴趣。但是，量子力学还存在着一个严重的困难，即如何使这一理论适合于相对论。当然，在微观世界中，引力场的影响是无关紧要的，可是一旦涉及到粒子的速度与光速可比拟时，仍然需要考虑狭义相对论。在薛定谔方程中，对时间坐标的微商是一次的，而对空间坐标的微商却是二次的。这种对时空坐标微商的明显不对称使薛定谔方程不具有洛伦兹协变性，因而它不是相对论性的方程。1926年4月和9月，克莱因和高登(Gordon)先后找到了所谓的“克莱因-高登方程”。实际上，该方程首先是由薛定谔发现的，由于它不能给出氢原子的正确光谱，薛定谔以为自己失败了，因而没有发表它。

克莱因-高登方程只能描写自旋为0的粒子（如π介子），而不能描写自旋为$\frac{1}{2}$的粒子（如电子）。使狄喇克不能接受的是，该方程不仅违背变

换理论，而且居然导致了在物理上没有意义的负几率。狄喇克在其他物理学家心安理得、沉湎现状（连玻尔尚且认为克莱因-高登方程已解决了相对论性的问题）的情况下，决心找出电子的相对论性方程。他使薛定谔方程对时间的微商仍然保持一级，而把对空间坐标的微商由二级修改为一级，从而使薛定谔方程具有时空对称性。在推导过程中，狄喇克冥思苦想，把满足泡利电子自旋理论的二行二列矩阵，变为四行四列的矩阵，从而闯过了难关，于1928年成功地建立起相对论性电子运动方程。正如狄喇克本人所说："从此，人们有了一个新的波动方程，它与量子力学的基本原理相一致，而且与狭义相对论的对称性要求相符合。同时还证明，这一波动方程，自动给出了电子半量子数自旋，还给出了电子所具有的磁矩。"此外，狄喇克还根据方程的负能解，经过一年多的潜心求索，提出了一种崭新的真空图象的解决方案，并于后来预言了人们从未认识过的反物质——正电子的存在。1932年8月，安德孙（C.D.Anderson）在宇宙线实验中发现了这种新粒子。

这样一来，量子论和相对论在狄喇克方程中完满地统一起来了，量子力学最终建成了。量子力学

从根本上摆脱了传统理论的框架，波粒二象性、互补性、物理量不可对易性、测不准关系等都与经典观念格格不入，这种全新的关于自然界的描述方法和思维方式在科学与哲学领域引起了巨大的反响。1930年，狄喇克出版了集大成著作《量子力学原理》，对量子力学进行了更为普遍的综合。在该书中，矩阵力学和波动力学只是作为一种特殊情况而出现。在狄喇克的理论体系中，需要使用一些非传统的数学，然而最终是数学家冯·诺意曼(John von Neumann，1903—1957）把量子力学理论放在了一个较为坚实的数学基础上。

8.9 关于量子力学诠释的争论

围绕着量子力学理论形式体系的物理解释问题，以玻尔为首的哥本哈根学派和爱因斯坦等人展开了旷日持久的论争。这是物理学史上持续时间最长、斗争最激烈、最富有哲学意义的论战之一。

爱因斯坦和玻尔的争论开始于1920年4月。当时，玻尔到德国柏林访问，第一次与爱因斯坦会面，他们两人就量子理论的发展交换了意见，谈话的主题是关于光的波粒二象性的认识问题。乍看起

来，这次争论好象是爱因斯坦主张，完备的光理论必须以某种方式将波动性和粒子性结合起来，而玻尔却固守光的经典波动理论，否认光子理论基本方程的有效性。然而，仔细分析就会发现，玻尔强调需要同经典力学的观念作彻底的决裂，而爱因斯坦虽则赞成光的波粒二象性，但却坚信波和粒子这两个侧面可以因果性地相互联系起来。在此稍前（1920年1月27日），爱因斯坦在写给玻恩的信中，陈述了他对物理现象应该有一个统一因果性的信仰："光的量子吸收和发射是否有朝一日总可以在完全的因果性的意义下去理解呢，还是一定要留下一个统计性的尾巴？我必须承认，在这里我缺乏判决的勇气。无论如何，要放弃完全的因果性，我将是非常、非常难受的。"

1923年康普顿实验确证了光量子后，玻尔同爱因斯坦的争端达到头一次高潮。为了应付这一局面，玻尔在1924年写的一篇文章中完全摒弃了爱因斯坦的辐射量子结构的观念，取而代之的是一种彻底的几率方法，他认为能量和动量守恒定律对单个原子基元过程并不成立，仅仅在统计上才能谈到守恒。对此，爱因斯坦在同年4月29日致玻恩夫妇的信中予以反驳："我决不愿意被迫放弃严格的因果

性，而对它不进行比我迄今所已进行过的更强有力的保卫。我觉得完全不能容忍这样的想法，即认为电子受到辐射的照射，不仅它的跳跃时刻，而且他的方向都由它自己的自由意志去选择。在那种情况下，我宁愿做一个补鞋匠，或者甚至做一个赌场里的雇员，而不愿意做一个物理学家。固然，我要给量子以明确形式的尝试再三失败了，但我决不放弃希望。况且即使永远行不通，总还会有那样的安慰：这种不成功完全是属于我的。”

1926年夏天，尽管矩阵力学和波动力学的数学等价性已被证明了，数学方案的一致性也无人怀疑了，但对这个形式体系的物理解释仍然各持己见。薛定谔开始发表他的波动力学论文时，根据德布罗意的独创性思想，把物质波与电磁波相比较，认为物质波是三维空间中真实的、可观测的波，他的方程中的Ψ是波动的振幅，$|\Psi|^2$为电荷密度，并且希望建立在一个彻底的波动概念之上的物理学。他对量子理论的不合理特征，特别是“该死的量子跃迁”十分反感，他在一次谈话时对玻尔说：“如果我们打算保留这些可恶的量子跃迁的话，那我总对我曾同原子物理学打过交道而感到遗憾。”他在一个时期还认为，量子跃迁能够完全避免，一个系统的稳

定态被规定为驻波，它们的能量实际上是波的频率。波动方程的一个波包能够表示一个粒子。但是，波包随着时间的推移要散开，这不符合粒子的稳定性。为此，玻恩在1926年6月提出了波函数的统计解释。他认为 $|\Psi|^2$ 是粒子在位形空间中出现的几率。按照玻恩的观点，事件的全过程决定子概率定律。对应于空间的一个状态，就有一个由伴随着这个状态的德布罗意波确定的几率。因此一个力学过程伴随着一个波动过程，即由薛定谔方程描述的导波，导波给出这个力学过程一个确定的几率，而不能给出力学变量的确定值。例如，若在空间某点导波的振辐为零，这意味着在这点发现电子的几率小到零。爱因斯坦对玻恩关于波函数的几率解释甚为不满，这从他在1926年12月写给玻恩的信中可以明显看到："量子力学固然是堂皇的。可是有一种内在的声音告诉我，它还不是那真实的东西。这理论说得很多，但是一点也没有真正使我们更接近这个'恶魔'的秘密。我无论如何深信上帝不是在掷骰子。"很明显，爱因斯坦坚信能够提供关于客观存在世界的知识。玻恩等人认为情况并非如此，在任何既定时刻，我们关于客观世界的知识只是一种粗糙的近似。由于这种近似，应用某些象量于力学几

率定律那样的规律，我们能预知未知的情况。这正是他们关于统计规律有效性争论之所在。

1927年最初几周，海森伯在哥本哈根独自思索这样一个问题，一个电子在云雾室中的轨迹怎样表示成量子力学的方案呢？在海森伯百思不得其解而陷于绝望之际，他想到了爱因斯坦1926年春与他的一次谈话：正是理论决定了我们所能观测到的东西，于是他试图转向这个问题。海森伯后来回忆道："在自然界中或者在实验室中只出现量子力学方案所描述的情况，这也许是真的吗？这意味着在云雾室里没有真实的电子轨迹，有的只是一连串的微小水滴。一个个微小的水滴不准确地确定了电子的位置，并且由这一系列的微小的水滴可以推定电子的速度。这种情况实际上可以用数学方案来表示，这个计算给出位置和动量不准确度的乘积的一个下限。"这就是所谓的"测不准关系"，其数学表达式是 $\triangle x \cdot \triangle P_x \geqslant \frac{h}{2}$。

测不准关系表明：微观粒子的某些成对的物理量不可能同时具有确定的数值，例如位置和动量，方位角与动量矩等，其中一个量愈确定，则另一个量就愈不确定。测不准关系显示出限制经典概念有

效性的特殊形式，玻尔为此付出了他的心血，做了更为普遍、更为透彻的分析。1927年9月，玻尔在纪念伏打（Alessandro Graf Volta, 1745-1827）逝世一百周年的科摩国际物理学会议上发表了“量子公设和原子论的最近发展”的讲演，首次全面地阐述了互补性原理，以后他又花了大量时间，精心雕琢这一基本观点，深入探索它的全部意义，并把它推广到量子力学以外的领域。玻尔认为，微观粒子现象的任何观察，都将涉及一种不可忽略的和观察仪器之间的相互作用。因此，就不可能既赋予现象又赋予观察仪器以一种通常物理意义下的独立实在性了，它将不可避免地导致互补关系和因果关系的几率形式。观察仪器分为两类：测定位置的和测定速度（或动量）的。只有把这两类仪器的结果互补起来，才能得到对粒子的完全认识。描述同一微观现象，可用很不相同的，甚至截然相反的图象来描述，例如波动图象和粒子图象，但二者却互相补充，缺一不可。摆弄这两种图象，从一种图象转到另一种图象，然后又从另一种图象转回到原来的图象，我们就最终能够得到隐藏在实验后面的实在的正确印象。玻尔的互补原理被哥本哈根学派推崇备至，被认为是一个普适的哲学原理。玻恩后来在他的文

集中这样评述道："就这样，古典的科学的哲学变成了现代的科学的哲学，这种哲学在尼耳斯·玻尔的互补原理中达到了顶峰。"与此相反，薛定谔对哥本哈根学派这一超经验的、几乎是超自然的解释表示关注和失望，他重复地确定了电子犹如波动的概念，并且试图建立不依赖于电子犹如粒子的理论。爱因斯坦则断然拒绝哥本哈根学派对量子力学的解释，他称这种解释是"海森伯-玻尔的绥靖哲学"或"绥靖宗教"。他认为，这种哲学或宗教向他们的信徒暂时提供了一个舒适的、一躺下去就不是那么容易惊醒的"软枕"。

1927年10月，在布鲁塞尔举行的第五届索耳未物理学会议上，量子力学的哥本哈根解释为当时的许多物理学家所接受，成为正统的解释，但是它也受到来自各方面的批评，特别是爱因斯坦的尖锐批评。这次会议的议题是"电子和光子"，它为新量子论的最高级讨论提供了讲坛。在这次会议上，德布罗意提出了领波（Pilot wave）理论，但并没有赢得多少支持，就连他本人也开始怀疑是否能把Ψ想象为一个真实的物理场，于是他不久便宣布皈依互补性诠释。玻恩和海森伯在他们的报告结尾断定："我们认为量子力学是一个完备的理论；它

的基本的物理和数学假设是不容许进一步加以修改的。”在这次会议上，爱因斯坦几乎是单枪匹马地进行战斗，他认为波函数不是代表单个电子，而是代表分布在空间中的电子云。$|\psi|^2$表示在被观察的那一部分空间有电子云的一个粒子存在的几率，而不是表示在所考虑时刻的那一瞬间一个特定的粒子存在于所给地方的几率。因此，量子力学只能给出相对来说是无限多个基元过程的集合的知识，而不能完备地描述某些单个过程。这次会议，是以玻尔成功地捍卫了互补性诠释的逻辑无矛盾性而结束的，但玻尔并未使爱因斯坦信服他的逻辑必然性。

在1930年的第六届索耳未会议期间，爱因斯坦精心设计了一个包括时钟和量尺的思想实验，想以此打乱测不准关系。玻尔经过一个不眠之夜，发现爱因斯坦在推理时，竟忘记他自己发明的效应：在引力场中，时钟会延缓。结果使爱因斯坦否定测不准关系的光箱辐射思想实验反倒变成了论证测不准关系的理想仪器。

从1935年起，爱因斯坦的矛头所指不再是哥本哈根学派方法的不连贯性，而是方法的不完备性。这年5月，他与波多耳斯基（B.Podolsky）和罗

森（N.Rosen）共同发表了一篇题为“能认为量子力学对实在的描述是完备的吗？”的文章，提出了著名的EPR悖论。爱因斯坦认为，波动函数所提供的关于实在的描述是不完备的，他从不认为量子力学放弃了严格的因果律，也不承认物理学理论在对完全确定的实验结果的明确描述方面存在局限性。玻尔不久撰文对EPR悖论进行答辩与驳斥。爱因斯坦和玻尔的争论一直延续到爱因斯坦逝世，但是这场论战并未就此终止。

当时，尽管量子力学取得了很大的成功，但爱因斯坦始终不附和哥本哈根学派的时髦理论。他希望将来能够建立起将量子理论也能概括在内的物理学的统一的理论基础，它既能直接描述事件本身，而又同经验事实相符合。他认为，尽管量子理论的统计描述与经验事实一致，但是作为一种普遍的理论还应该是决定论的。他用莱辛的名言自我安慰：对真理的追求要比对真理的占有更为可贵。

就这样，爱因斯坦选择了一条与众不同的道路艰难地跋涉着，这使他的同事们深感遗憾。1948年，玻恩在谈到爱因斯坦时，概述了人们对他的看法：“比起前人，他对各种物理学定律的统计学背景看得更为清晰，而且，在征服浩瀚的量子现象的斗争

中，他是一个先驱者。后来，从他自己的著作中出现了统计学原理和量子原理的综合，这种综合对大多数物理学家似乎是可接受的，但他却远而疑之。我们许多人认为这是一个悲剧——因为他从此在孤独中摸索前进，而我们则失去了一位领袖和旗手。”然而爱因斯坦并不认为自己误入歧途，他在1948年3月18日写给玻恩的信中说：“我实在非常了解你为什么要把我看做是一个不悔改的老罪人。但是我相信你并没有了解我是怎样走过我这条孤独的道路的；即使没有丝毫的可能性会使你赞同我的看法，也肯定会让你觉得有趣。我要把你的实证论的哲学看法撕得粉碎，以此来自娱。但是看来，在我们活着的时候，这是不可能实现的。”玻尔承认，在1955年爱因斯坦逝世后，他心里好象仍和爱因斯坦争论。每当他沉思物理学中有争议的基本问题时，他总要扪心自问：爱因斯坦对这个问题是怎么想的。1962年玻尔去世前一天的傍晚，他的工作室黑板上所画的最后一个草图是爱因斯坦的光子箱草图，这个草图与他们争论的主要问题有关。

以玻尔为首的哥本哈根学派和爱因斯坦围绕对光的波粒二象性的认识、波函数的统计解释、测不准关系的逻辑严密性以及量子力学对实在的描述是

否完备等问题进行了富有意义的争论。争论的焦点由对物理学问题的理解发展到对哲学问题的看法。玻尔等人认为爱因斯坦的错误所在是坚持实在论，爱因斯坦则认为玻尔等人的实证论态度难以使人喜欢和赞同。争论的背后隐含着一个古老而复杂的哲学命题：我们所认识到的自然界的规律性是否就是自然界本身所固有的规律性？尽管这两位科学巨人早已相继离开人世，但是他们争论中所涉及到的问题至今依然使人感到兴味盎然，不仅促使一些物理学家去钻研，而且也引起一些哲学家去思考。而且，爱因斯坦和玻尔这两位科学大师的争论，也为我们树立了科学争鸣的良好范例。他们在科学观点方面是毫不妥协的论敌，而在个人关系方面却彼此敬重、亲同手足。在他们的言词中，严厉和亲切交织在一起，最激烈地交换意见，但始终没有委屈之感。诚如爱因斯坦所说："人们只会同他的兄弟或者亲密的朋友发生真正的争吵；至于别人，那就太疏远了。"

第九章

谁是革新派？
谁是保守派？

9.1 机械学派（力学学派）和批判学派

十九世纪末叶，在经典物理学基础面临大变革的前夕，物理学家的队伍发生了分化。那些具有创新精神的人们在摸索、在苦斗，渴望在建立物理学新秩序中留下他们的印记；那些囿于传统观念、具有浓厚保守气息的人们对新事物不是抵制反对，就是怀疑观望，极力设法把它们纳入旧理论的框架之中；也有的介于二者之间，他们既有这一代人的乐观主义，又兼有这一代人的忧虑之情，他们既为新

天地的开拓而兴奋，又为变革的急剧和显然缺乏固有的稳定性而感到不快。

法国哲学家莱伊（Abel Rey）在他1907年出版的《现代物理学家的物理学理论》一书中非常详细地论述了当时的状况。他写道：在十九世纪前六十年中，物理学家在一切根本问题上彼此是一致的。他们相信对自然界的纯粹力学的解释，他们认为物理学无非是比较复杂的力学，即分子力学。他们只是在把物理学归结为力学的方法问题上，在机械论的细节上有分歧。现在，物理学展示出的景况看来是完全相反的。严重的分歧代替了从前的一致，而且这种分歧不是在细节上，而是在基本的、主导的思想上。如果说每一个学者都有自己的特殊倾向，那未免过甚其辞。但是，毕竟必须承认，物理学也有很多学派，它们的结论常常是分歧的，有时候简直是敌对的。

莱伊指出：传统物理学认为，只要使物理学延续下去就可以达到物质的形而上学。这种物理学使自己的理论具有了本体论的意义，这些理论完全是机械论的，即把物理学归结为力学的观点的体系。但是，十九世纪后半叶对传统机械论所作的批判破坏了机械论的这个本体论实在性的前提。在这种批

判的基础上，确立了对物理学的一种哲学看法。依据这种看法，科学不过是符号的公式，是作记号的方法。

莱伊根据物理学家的认识论倾向，把他们分为三个学派：唯能论或概念论学派，绝大多数物理学家还在支持的机械论或新机械论学派，介于这两种学派之间的批判学派。莱伊认为，马赫和迪昂属于第一个学派，彭加勒属于第三个学派，旧物理学基尔霍夫、亥姆霍兹、开耳芬、麦克斯韦以及现代物理学家（这是莱伊当时的说法）拉摩、洛伦兹等人属于第二个学派。英国唯灵论者华德（James Ward）也从物理学家的认识论观点出发，把他们分为实在论学派和符号论学派。莱伊和华德都是哲学家，纯粹从哲学角度看问题，似乎是他们的职业习惯和个人嗜好。

从前面的历史考察不难看出，实际上，当时物理学家的分化和学派的形成主要是由于对经典力学截然不同的态度而引起的。特别是1883年马赫的《力学》出版后，这种分化已十分明显。当时形成了两个基本派别：机械学派（或力学学派）和批判学派。机械学派坚持对一切物理现象的纯力学解释，企图把整个物理学归结为力学，绝大多数物理学家

都属于这个学派。批判学派对经典力学的基本概念和基本原理持明显的批判态度，马赫、彭加勒、迪昂（Pierre Duhem, 1861-1916）、奥斯特瓦尔德（Wilhelm Ostwald, 1853-1932）和毕尔生（Karl Pearson, 1857-1936）属于这个学派。

在以往的一些出版物中，大都倾向于抬高机械学派，贬低批判学派，甚至全盘否定后者的历史作用和哲学思想。这是不够客观和公正的。

9.2 两种历史作用

在世纪之交物理学危机时期和革命初期，这两个学派各自起了怎样的历史作用呢？

可以看到，机械学派对经典物理学的发展作出了不可磨灭的贡献。由于他们的人数处于绝对优势，因而他们在这方面的贡献是批判学派无法相比的。机械学派把经典理论发展到十分完备的程度，客观上为物理学革命的到来准备了条件。

但是，机械学派也继承了从十八世纪以来就产生的力学先验论和机械自然观。在一系列新发现摇撼了整个物理学的基础时，他们看不到物理学的危机或危机的严重性，找不到摆脱危机的出路，对新事

物或怀疑观望，或横加反对，至多不过是在旧框架内修修补补。

开耳芬就是这样。对于X射线的发现，他竟宣称这是一场“精心策划的骗局”。对于镭的热效应的发现，他甚至不顾自己早年为之作过巨大贡献的热力学第二定律，硬说热能是从周围得到的。他竭力反对元素嬗变理论，理由是该理论与“原子”的词源（原子在希腊语中意味着不可分）相矛盾。1906年8月，开耳芬几乎单枪匹马在《时代》杂志向元素嬗变说挑战。他居然说，嬗变理论是为了解释镭的性质而巧妙捏造出来的，镭产生氦并不能证明原子嬗变，因为镭原于中本来就含有氦。他不承认太阳的能源来自元素转化，而把能源归因于万有引力。开耳芬始终迷恋以太模型，1907年，他在逝世前的最后一次公开露面时，还宣读了一篇论述以太的文章，表示赞同洛奇的观点：“空间中每立方毫米的宇宙以太其质量为一千吨。”

洛伦兹也是这样，他总想在不触犯经典理论框架的前提下把力学和电动力学调和起来，一直认为以太是具有一定优点的概念。他在倾注了毕生心血的《电子论》的末尾写道：“以太是具有能量和振动的电磁场的载体，我不能不认为它具有某种程度

的实在性，不管它与普通物质的差别有多大。”洛伦兹面对波粒二象性的新概念，曾绝望地哀叹，“在今天人们提出了与昨天所说的绝然相反的主张。这样一来，已经没有真理的标准了，也不知道科学是什么了。我真后悔我未能在这些矛盾出现前五年死去。”

机械学派其他代表人物的表现也都大同小异，而批判学派的代表人物的态度却迥然不同，他们很早就以革新者的面目出现了。

马赫不仅是物理学新时代行将到来的启蒙者和相对论的先驱，而且也对量子论本身的发展作过直接贡献。温伯格（Carlton Bereda Weinberg）在1937年曾经指出，马赫于1870年以后在原子理论方面应用了“n维离子”的思想，预见了后来的薛定谔和其他量子物理学家的工作。当时，马赫引入n维空间的目的是为了表示可观察和可测量的原子间行为的最大自由度。这个n维空间或者n维自由度数由对实验材料的成功表示和正确描述来确定，这个程序正是量子力学的特征。另外，1933年吕威（Heimrich Löwy）发表了一篇“关于量子论的一个历史备忘录”的文章，说马赫在普朗克发现作用量子的前五年（1895年），曾在一封信中就化学运动

表明了不连续性的观点，并且在1896年出版的《热学原理》一书中也作了记载，普朗克曾仔细地读过这本书，理应了解马赫这一观点。温伯格于1937年进行过重演马赫关于化学运动不连续性理论的测量，以检验马赫的理论是否是一个预见，以及是否可能对普朗克的工作发生影响。温伯格和另一位马赫的追随者尼索拉夫斯基（General Victor von Niesiolowski）都认为，马赫是量子论的先驱。当然，这个断言是否完全正确，恐怕还有待于进一步研究，但马赫的思想对量子论发展有积极影响却是事实。

从1902年起，彭加勒在接连出版的三本有代表性的著作中，也对经典力学的基础进行了批判。与马赫不同，他不是纯粹从哲学和逻辑上进行批判的，他还依据了当时大量的实验事实，而且批判的范围也涉及到经典物理学的一些基本概念和原理。彭加勒不仅是狭义相对论的先驱之一，而且在1905-1906年的论文中还试图提出新引力理论。他的新引力理论建筑在下述假设之上：引力的传播不是瞬时的，而是以光速进行的。彭加勒也对量子论的发展作过直接贡献。在1911年的索耳未会议之前，他对量子论持明显的否定态度，但是会议的结果大大激励了

彭加勒这位“理性科学的活跃智囊”，促使他在临终前的半年时间内，以难以置信的毅力和速度从事量子论这项困难的研究。他先后写出了长篇专题论文和一篇评述性的文章。他认为，“把不连续性引入自然定律”，“这样一个非同寻常的观点能够成立”，量子论的出现，“无疑是自牛顿以来自然哲学所经历的最伟大、最深远的革命”。他对普朗克修正1900年的理论（普朗克在1911年认为，振子只在发射电磁辐射时才是量子过程，而吸收则是连续进行的）感到困惑，他断言“坚持最初的观点是合适的”。直到1911年，量子论可以说几乎是德国专有的物理学。声名卓著的非德国科学家彭加勒转而热情地相信量子，这件事本身就有助于量子论的广泛传播。事实上，彭加勒的论文大大促进了人们对量子论的兴趣，他的结论对学术界的影响远远超过爱因斯坦（爱因斯坦的新奇思想一时还难以为人们所充分理解）。普朗克评论道：“在一篇论述量子论的意义深远的论文中，彭加勒被证明是有青春活力的、有批判力的和多产的。”

除彭加勒而外，继马赫之后，批判学派的其他人物也对经典力学的基本观念展开了批判。例如，毕尔生标榜“批判是科学的生命”。他在1892年出

版的《科学原理》中声称："在我们这个本质上是科学研究的时代，怀疑与批判的优势不应该视为绝望与没落的征兆，它是进步的保障之一。""科学最致命的症候就是，科学统治集团中那些墨守成规的人把对他们成果的怀疑和批判视为异端邪说，而且加以排斥。"毕尔生在书中逐一审查了经典力学的基本概念和基本定律，引人注目的是，毕尔生在"机械论的界限"一节中，提出了力学定律对微观对象是否适用的问题。毕尔生这位彻底的唯心主义者否认物质的客观存在，在他看来，物理世界只不过是一些感性知觉群。他把我们"所认识的物理世界模型"按照由大到小的顺序排列为物体、粒子、分子、化学原子、初始原子、以太单位，并认为前者依次由后者构成。毕尔生问道："描述两个粒子相对运动的定律是否对于两个分子、两个化学原子、两个初始原子、最后对于两个以太单位还能认为是成立的？"他认为现在这是一个很重要的争论点，"这点好象总是没有被充分注意"。但是，他认为这个问题在当时还不能立即作出回答，因为"我们还没有一个比我们现在所达到的更为清楚的初始原子的概念。"奥斯特瓦尔德、迪昂也对经典力学和机械自然观进行了不同程度的批判。

批判学派虽然对经典力学和经典物理学的基本概念和基本原理进行了尖锐的批判，但并不意味着完全抛弃它们。关于马赫和彭加勒的观点前已述及，毕尔生在《科学原理》中也说："对于牛顿和拉格朗日动力学来说，现代科学所作的一切就是精确地确定它们正确适用的界限，或者如果正确性不能被承认时，它们能以什么近似程度可以被应用。"因此，指责批判学派全盘否定物理学的旧原理，鼓吹科学真理已全部崩溃了，显然是不符合事实的。

不错，批判学派确实否定过原子、分子的实在性。不用说，这是他们的一个失足之处。但是对这个问题也需要作一点具体的历史分析。首先，对于原子的存在，直到1908年佩兰实验之前，还没有充分可靠的实验证据。马赫正是从他的经验论出发，以"我们无论在什么地方也不能感觉到原子"为理由而否定原子论。彭加勒则只是持一般的保留态度。他认为，原子假设还未成为实验事实，既不能认为是真实的，也不能认为是虚构的，它作为一种辅助假设到底有用还是无用，依然是一个悬而未决的问题。另外，原子论在解释热力学第二定律、气化热、渗透压、化学平衡等问题上也的确遇到了一些困难，奥斯特瓦尔德则主要出于为物理学和化学谋求统

一的基础而提出唯能论的。可见，判批学派的主要成员在这个问题上的态度并不完全一致。而且，后来他们也不同程度地承认了自己的错误。马赫在1913年声明，如果原子假设有可能使某些可观察到的性质在逻辑上联系起来，没有这种假设却永远无法联系，他就不得不接受原子假设。奥斯特瓦尔德在佩兰实验之后，立即公开承认错误，并在1909年新版的《普通化学纲要》中写道："我现在确信，我们目前已经具有了物质分立性或颗粒性的实验证据，这是千百年间原子假设苦苦求索而未获结果的证据。……这一切使那些最审慎的科学家现在也理直气壮地谈论物质原子论的实验证明了。"彭加勒也在1912年郑重宣布："长期存在的力学假设现在已认为具有充分的可靠性"，"原子论大获全胜了"，"原子现在已经是一种实在了"。

批判学派在这次物理学革命中还有其他一些保守的表现，但是在世纪之交物理学危机时期和革命初期，这个学派就它的主导方面而言，还是对物理学发展起了推动作用，是站在革新的立场上的。

9.3 不同的哲学根源

机械学派和批判学派两种截然不同的表现，可以从它们的哲学思想根源方面找到部分答案。

机械学派坚持的是机械唯物主义的认识路线。这种认识路线，一方面对经典力学和经典物理学的发展起了巨大的促进作用；一方面又因为“不了解一切科学理论的相对性，不懂得辩证法，夸大机械论的观点”（《列宁选集》第二卷，人民出版社，1972年第二版，第316页），因而在世纪之交的特定历史条件下，已基本失去了自己的积极意义，在一定程度上变为妨碍物理学发展的阻力了。

机械学派坚持机械论观点，实际上也无法将唯物主义贯彻到底。在世纪之交，当一系列新实验与旧理论发生尖锐矛盾时，机械学派不是不折不扣地从实验事实出发，积极谋求变革物理学，而是对新发现怀疑反对，对旧理论修修补补，自觉或不自觉地背弃了自然科学家固有的唯物主义经验论的立场。对于作为经典理论框架的基本概念和基本原理，机械学派忘记了它们的世俗来源，而把它们从经验的领域里排除出去，放到虚无缥缈的先验的顶峰上

去，宣称它们是神圣不可侵犯的宝物。这实质上已滑到唯心论的先验论了。在这种哲学思想的支配下，机械学派当然不能适应物理学的发展而成为革新派。

说来也怪，当时真正贯彻了经验论的，却是批判学派。仅管批判学派在哲学上对“经验”作了含糊不清、有时往往陷入唯心主义的解释，但是在他们的宣言中和科学实践中，他们却始终坚持一切从实验事实出发的原则。他们在新实验的基础上设法变革经典理论，他们在确凿的事实面前勇于修正错误。

同这种经验论相联系，批判学派的下述哲学思想也富有启发意义。

一、概念嬗变原则。马赫认为，概念不是绝对永久有效的，而是可以嬗变的。只要概念显得不适用，这些概念就会最好地和最快地被事实改正过来。当一个狭隘的专门科学领域的有效概念无法用于新的研究领域时，就需要创造一种适用于更广泛的研究范围的概念。经过嬗变的概念，既能说明不同的科学，还能超出它们的范围，获得广泛的应用。在世纪之交物理学概念经历急剧变化的年代，马赫的这一原则显然具有积极意义。爱因斯坦认为概念嬗变原则给了他很大的启示，他表示完全赞同这一原则，

并对此作了重要的引申和发挥。玻尔仿效爱因斯坦对待概念的灵活态度，提出了“对应原理”。海森伯甚至认为，物理学的发展实质上就是概念的发展。

二、知识的相对性原理。迪昂曾多次指出：“每一个物理定律都是暂时的和相对的，因为它们是近似的。”“恰当地讲，物理学定律既不真，也不假，而是近似的。”迪昂由于不能正确地阐明真理的相对性而陷入了唯心主义，但是他的知识相对性原理却无疑包含着辩证法的因素，对于否定经典理论的绝对主义形而上学，显然具有积极的作用。同样，彭加勒在谈到物理学一些基本原理的灵活性和预言新力学的大致图景时，也正确地涉及到知识的相对性与绝对性的相互关系问题。正因为如此，他才可能对科学发展的规律性持有比较正确的看法。

三、约定论。彭加勒认为：“在科学的某些基本原理中可以看出自由约定的特征”，“约定是我们精神的自由活动的产品”。乍看起来，这似乎是唯心主义的说教。但是彭加勒接着就明确指出：“自由并非任意之谓”，“学者所思考、所发现的世界”并不是“按照他自己的随意想象简单地创造出来的。”在彭加勒看来，我们在所有可能的约定中

进行选择时，既要受到“实验事实的引导”，又要受到“避免一切矛盾这一需要的限制”。彭加勒还认为，有些约定实际上是一种假设，而“假设总是应该尽可能迅速、尽可能经常地受到检验。当然，如果不能经受这一检验，人们就应该毫无保留地抛弃它。”显而易见，彭加勒所谓的“约定是我们精神的自由活动的产品”，并不是随心所欲的杜撰。约定论既要求摆脱康德的先验论，特别是表现在对待经典理论的那种绝对主义的形而上学上，又要求摆脱休谟的经验论。这反映了科学上自由创造，自由假设的要求，在哲学上有其积极的一面。爱因斯坦所提出并贯穿于他的科学活动中的“概念是思维的自由创造”思想，在思想渊源上是与之相联系的。

批判学派的这些哲学思想，包含着丰富的辩证法因素以及某些唯物主义成分。特别是辩证法，正是机械学派所十分匮乏的。在这些富有启发、富有成效的思想的引导下，批判学派才能在物理学革命中起革新作用，促进了相对论和量子论的发展。当然，批判学派在发挥这些思想时往往走上另一个极端，以至于对物质与意识的关系问题作出了颠倒的回答，明显地陷入了唯心主义。对这一点进行马克思

主义的批判是完全必要的。但是，不应当因此而全盘否定批判学派的哲学思想。

列宁说过："聪明的唯心主义比愚蠢的唯物主义更接近于聪明的唯物主义"（列宁：《哲学笔记》，人民出版社，1972年第二版，第305页）。列宁的这段寓意深刻的论述为我们指出了对待批判学派和机械学派所应采取的正确态度。正因为批判学派在特定的历史条件下"更接近于聪明的唯物主义"，所以它才有可能在世纪之交物理学革命的舞台上扮演革新派的角色。

9.4 历史的必然道路

机械学派的代表人物，都是一些学识渊博、才能出众的科学大师，他们对经典物理学的贡献可谓有口皆碑。但是，当一系列的新实验动摇了他们苦心经营的经典理论的基础时，他们却囿于传统的机械观，担当不起物理学革命的重任。他们甚至走到了新物理学的门槛，却无力打开这扇通向一个新世界的大门。

批判学派的代表人物，不仅造诣极深、才华横溢，为经典物理学的发展作出了巨大的贡献，而且

与前者不同，他们思想敏锐，富于探索精神，为物理学革命开拓了道路。但是，他们担当了物理学革命的重任吗？也没有。究其原因，在于这个学派的唯心主义哲学前提，在于它的狭隘经验论，即实证主义的局限性。这种错误倾向，不仅对科学的发展有一定的消极作用，而且也未能使批判学派完成物理学革命的历史任务。

爱因斯坦曾经批判马赫说："我看他的弱点正在于他或多或少地相信科学仅仅是对经验材料的一种整理；也就是说，在概念的形成中，他没有辨认出自由构造的元素。在某种意义上他认为理论是产生于发现，而不是产生于发明。他甚至走到这样的地步：他不仅把'感觉'作为必须加以研究的唯一材料，而且把感觉本身当作建造实在世界的砖块，……只要他把这种想法贯彻到底，他就必然会不仅否定原子论，而且还会否定物理实在这个概念。"爱因斯坦的这个批判深中肯綮，大体上也适用于整个批判学派。的确，这个学派把经验强调到不适当的程度，以致于轻视或根本否认理论和理论思维在科学中的地位和作用。

正因为如此，尽管马赫走到了相对论的门口，但他不仅没有发现相对论，而且至死都厌恶相对论。

彭加勒也是相对论的先驱，但是由于他没有把从大量经验事实中得到的两个假设提到普遍的形式原理的高度上来看待，因而没有达到相对论，因为他在实践中仍然没有彻底挣脱狭隘经验论的羁绊。批判学派不懂得，科学理论决不是经验事实的简单陈述和分类，它总是不断地揭示现象背后潜藏的本质。而且，理论本身都具有思辨的性质，理论的内容愈丰富、愈深刻，也就愈抽象、愈远离感觉经验。如果真要把所谓"形而上学"即理性思维从科学中排除出去，科学就会失去灵魂，变成毫无发展可能的枯骨。

由前面的论述可以看出，在世纪之交的物理学革命中，批判学派尽管与机械学派不同，起过某些积极作用，但又由于哲学上的局限性，无法担当起彻底完成这一革命的重任。另一方面，早在十九世纪四十年代马克思和恩格斯就创立了辩证唯物主义，遗憾的是，这一革命的学说并未在物理学家中间得到传播。因此，这一重任最终只能历史地落到那些吸取了两个学派长处的科学家的肩上。从物理学革命中三个新领域的开拓者卢瑟福、普朗克和爱因斯坦的身上，人们不难看出这一点。

卢瑟福是一位卓越的实验物理学家，他的一切理论都是以实验为基础的，因而也经得起实验的检

验。他从不崇拜偶像、迷信权威，一旦世界上哪个实验室宣布取得了重大成果，他几乎都要亲自动手实验几次，以断定其可靠性和准确性。他的哲学观点和所受的思想影响虽然不象爱因斯坦和普朗克那样明显，但有两点在他身上却是清晰可辨的：一是坚持了唯物主义的认识路线，二是摆脱了机械自然观的束缚。作为一个天才的实验物理学家，他对“纯粹理论家”怀有自然的不信任感。他喜欢说：“他们玩弄象征，而我们揭示真实可靠的事实。”但是，与那些偏向纯粹经验的代表人物不同，他并不否定理论的作用。他认为，理论同实践的紧密联系是世纪之交物理学迅速发展的最重要的源泉。卢瑟福在一次演说中充分评价了基础研究的意义。他说：“不应完全排除基础研究对我们认识自然规律的意义，经验表明，对人类具有最重大意义的发现基本上出自我们对自然过程的知识为唯一目的的研究。”卢瑟福也能充分认识到数学形式体系在物理学进步中的价值。据玻尔回忆，卢瑟福常常对新的理论方法表示赞赏，他甚至对量子论的哲学涵义问题也很感兴趣。卢瑟福和索迪关于嬗变理论的提出，就是他们唯物主义认识路线的胜利。本来，居里和卢瑟福用相似的实验方法探讨相似的问题，而且居

里既有镭源，又有较早开始研究的有利条件，可是他却没有取得进一步的突破，并且在若干年内还抵制嬗变理论。其原因在于居里深受实证主义和唯能论的影响。而卢瑟福的哲学与居里不同，当他最初迷上受激辐射后，就倾向于一个大胆的物质假设：钍射气是一种气体，受激放射物是物质淀质。由于方向对头，他很快就取得了成功。嬗变理论冲破了传统的物质观，卢瑟福是了解他的理论的重大意义的。他明确地讲过："原子永恒不变的学说""遭到无情的打击"，"看来很清楚，在如此微小的距离内，带电粒子间普通的力学定律显然已经破产了"。

普朗克从献身于科学时就坚信："外部世界乃是独立于我们的绝对的东西，而去寻找那些适合于这个绝对东西的规律，在我看来就是科学生涯最美好的使命了。"普朗克在基尔时期（1885—1889）也算是马赫哲学的信徒，曾对机械观进行过批判。后来在反对唯能论的斗争中和玻耳兹曼的影响下，他看透了马赫哲学根本不可能真的从物理认识中清除一切形而上学要素。于是在九十年代，他抛弃了马赫的狭隘经验论。正是在自然科学家固有的唯物主义思想的制寻下，他于1897年转向黑体辐射的研究，

企图从辐射光谱中寻找某种“绝对东西”的体现。1900年10月，他从现有的实验材料出发，凑出了黑体辐射的经验公式。为了从理论上推导这个公式，他作了各种尝试，最后不得不改变原先对原子论的冷漠态度，并从玻耳兹曼关于热力学第二定律的统计观点的反对者转变为支持者，从而摸索到了正确的路径。可是，普朗克没有象机械学派那样囿于机械观，把玻耳兹曼的经典理论视为教条，而是在两个关键之处有所突破（熵与几率的关系式和量子假设），终于在1900年12月14日作出了划时代的发现。也就是在追求客观规律哲学思想的指引下，他第一个明确支持狭义相对论，并鼓励他的学生审查该理论对广泛的物理过程的应用，他本人也写了几篇论文，出色地论证了相对论的富有启发性的威力，尽管相对论当时还没有什么实验证据。当然，普朗克在量子论方面的开创性的工作不是完全自觉的，他所采取的行动也多半是承认现实的力量强使的结果。但是，他的发现客观上却揭开了量子革命的序幕，尽管他长时间没有认识到这一点。然而，普朗克对机械观的批判并不彻底，他认为：“为了达到研究的目标，利用机械观还是有成功的可能的”，“没有必要对力学说明的可能性抱恐惧心理”。因此，

普朗克在迈出了关键性的一步后就开始犹豫彷徨，怀疑自己的推导，竭力把量子论与经典理论调和起来。1911年，他收回了1900年的部分观点，认为振子只在发射电磁辐射时才是量子过程，而吸收则是连续进行的。到1914年，他完全收回了自己1900年的观点，认为不仅吸收，而且连发射也是连续的了。普朗克后来回忆起这件事时说："我企图设法无论如何也要把作用量子纳入经典理论的范畴里，结果总是枉费心血。我的这种徒劳无功的尝试持续了好多年。我的许多同事都认为这近乎是一出悲剧。"正是由于没有彻底摆脱机械自然观，也使得他长时间认识不到狭义相对论引起了时空观念的重大变革，区分不开该理论与洛伦兹电子论的本质差别。出于同样的原因，他长期怀疑爱因斯坦的光量子论。1909年，约飞（А.Ф.Йоффе，1880-1960）遵循爱因斯坦的思想，从光量子论以及它和分子运动论的类似性推论出光线能量的平衡理论。普朗克收到约飞的文章后，虽然发表了它，但却力劝约飞，必须站在麦克斯韦观念的土地上。在不可避免的情况下，可以承认电子对光吸收的特殊性和另外一些特殊假设，但不要同电磁场理论决裂，也不要触动光本身。他说："经典理论给了我们这么多有用的

东西，因此必须以最大的谨慎对待它、维护它。”1913年，普朗克和其他人在建议接纳爱因斯坦为普鲁士皇家科学院院士的推荐信中依然认为：“爱因斯坦有时在他的推测中可能没有击中目标，例如在光量子的理论中就是如此。”普朗克的成功与失误能给人们以深刻的启示。

爱因斯坦是一位富有哲学素养的科学大革新家。他不仅从两个学派，特别是从马赫、彭加勒那里吸取了营养，而且也深受休谟经验论和斯宾诺莎唯理论的影响。在科学探索的活动中，他既“相信有一个离开知觉主体而独立的外在世界是一切自然科学的基础”，客观上又运用了某些辩证法思想，这促使他于1905年一举作出了三项惊人的大发现，全面打开了物理学革命的局面。

就这样，以爱因斯坦为代表的一批物理学家在这一次革命浪潮的推动下，自然而然地把注意力转向科学哲学，从中锻造他们的思想武器。他们坚持了机械学派的、也就是自然科学家固有的唯物主义立场，而抛弃了它的机械观；他们吸收了批判学派的经验论和某些辩证法因素，而避免了它的唯心主义和狭隘经验论。总之，他们对这两个学派既未全面肯定，也未全面否定，而是取其所长，避其所短，把

二者的优点有机地融为一体，因而显示了强大的战斗力，终于完成了时代赋予的使命。这就是历史所经历的曲折而又必然的道路。

第十章

历史是一面最好的镜子

古语云："以铜为鉴，可以正衣冠；以史为鉴，可以知兴替。"世纪之交波澜壮阔的物理学革命能够给我们什么启示呢？

一、科学是一种在历史上起推动作用的、革命的力量。

恩格斯在马克思安葬时的墓前演说中讲道："在马克思看来，科学是一种在历史上起推动作用的、革命的力量。"（《马克思恩格斯选集》第三卷，人民出版社，1972年第一版，第575页）世纪之交的物

理学革命证明了马克思主义的这一光辉论断。

这里所说的科学指的是自然科学。科学之所以能够成为在历史上起推动作用的革命力量，首先就在于它同社会生产力之间存在着不可分割的关系，它为生产力的发展不断提供新的生产工具，开辟新的生产资料领域，并给劳动者以新知识和新技能的武装，而且它在变革生产关系中也具有积极的作用。某些重要的科学进展往往被人们视为生产力发展和某一社会形态的重要标志。人们不是常把我们的时代称为"原子能时代"、"电子时代"、"太空时代"吗？可是，这些时代的产物都是在物理学革命的成果的基础上发展起来的。

人们认为科学是改造自然的武器，这是正确的，也是显而易见的。但是，也应当看到，科学所提供的日新月异的物质技术手段，它所创造和发展的科学思想、科学方法、科学精神，也日益成为改造社会、改造自身的强大武器。例如，在物理学革命前夕和初期，蔑视理论和理论思维的实证主义在科学家当中有广阔的市场，但是相对论和量子力学中的"四维世界"、"弯曲时空"、"质能关系式"、"波粒二象性"、"几率波"、"Ψ函数"等等，哪一个没有纯粹思维的痕迹呢？哪一个不是辩证法的生动

体现呢？出现在科学家面前的，已经远远不是一个赤裸裸的本来的自然，而成为马克思所说的“人化的自然”。经过物理学革命，不少物理学家认识到，“发展理论物理学的方法是辩证法，其立足点是唯物论。”特别是在日本，辩证唯物主义广泛渗透到物理学家中间，第一流的物理学家汤川秀树（1907-1981，因提出介子理论而于1949年荣获诺贝尔奖）、武谷三男、坂田昌一、宫原将平等人都在研究中自觉地运用自然辩证法。这除了社会背景因素而外，也可以说，世纪之交的物理学革命为他们准备了容易接受新思想的土壤。

二、科学的发展是波浪式的，而不是直线式的，既有量的积累，也有质的变革。

长期以来，科学的历史被视为一堆轶事和年表的堆砌，科学的发展被当作把不同货色的知识积累到理论货栈中。世纪之交的物理学革命表明，这种科学史观是不符合科学发展实际的。

还在物理学革命正在进行之中，彭加勒就提出了他的“危机-革命”观。经过物理学革命的洗礼，爱因斯坦认为，科学的发展既不是“一些定律的汇集”，也不是“许多各不相关的事实的目录”。在

科学的开拓工作中，“最初和最基本的步骤总是带有革命性的”。差不多科学上的重大进步都是由于旧理论遇到危机，“在实在跟我们的理解之间发生剧烈冲突时诞生的”。只是在这种冲突激化之前，当科学沿着已经开辟的思想路线继续发展的时候，它才“带有进化性”。

在本世纪六十年代初期，托马斯·库恩(Thomas Kuhn) 通过对科学史的多年潜心研究，在他的《科学革命的结构》一书中提出了一个比较完整的科学发展模式。在库恩看来，科学并不是以某种不变的速率发展着。相反地，存在着一个相对短暂的所谓“革命”时期。在这个时期，革命前占优势的思想规范（或者用库恩的话来说是“范式”）被推翻，并被新的范式所取代。在两次革命之间，有一个较长的所谓“常规科学”时期。在这个时期，新范式被发展、被应用。同时占统治地位的范式也逐渐暴露出无法使人满意的地方，不断产生“反常现象”。大量反常现象的涌现导致“危机”，危机是新理论诞生的一种适当的前奏，是科学革命的前兆。库恩的科学发展动态模式是：前科学→常规科学→危机→科学革命→新的常规科学→……

尽管库恩的范式概念十分模糊和庞杂（据有人

统计，范式共有二十一种用法），尽管他的科学发展模式并不能囊括各学科在各个历史阶段的发展过程，但是这一模式客观上揭示了科学发展由量变到质变的规律，强调科学革命在科学发展中的地位和作用，这些都是值得充分肯定和认真借鉴的。

彭加勒、爱因斯坦的科学发展观，特别是库恩的动态模式比较恰当地描述了物理学的发展史。可以毫不夸张地说，物理学诞生于哥白尼（Nikolaus Copernicus，1473-1543）、牛顿革命。这场革命可以说（当然是很粗略的）发生在1543年（以哥白尼的《天体运行论》一书的出版为标志）和1687年（这年牛顿的《原理》出版了）之间。在这百余年间，物理学经过伽利略、开普勒的初创和惠更斯的进一步发展，最后由牛顿集大成。这次革命之所以持续时间较长，其一是因为它要摧毁亚里士多德的自然哲学教条，这些教条在将近两千年间一直禁锢着人们的头脑，并始终被经院哲学当作不容争辩的真理；其二是当时科学成果和思想的交流受到种种条件的限制，远不如以后那样频繁和自由；其三是因为它要总结人类有史以来的物理学知识，创立一门真正的新学科。在哥白尼逝世时，任何一个欧洲人所了解的物理学知识是否象阿基米德（Archime-

des，公元前287-212）那样多，还是值得怀疑的。然而，到这场革命终结，经典力学已经牢固地确立起来了，能够说明天上、地上所遇到的一切力学现象，这在早先的岁月里是做梦也想不到的。照这样看来，百余年的革命并不算长。

其后出现了两百多年的常规科学时期。在这个时期，经典力学发展到具有精致而完美的结构的阶段，经典光学、热学、电磁学也在经典力学的理论框架内建立起来了。但是，到十九世纪末，接二连三的反常现象导致了物理学危机，从而爆发了第二次物理学革命。这次革命发生在世纪之交，讲得具体一点，也许可以说是从1895年X射线的发现到1928年相对论性电子运动方程的提出，历时三十余年。

三、科学革命的实质就是科学观念的根本改造，与此同时，也伴随着理论体系、自然观、科学方法等的全面变革。

在爱因斯坦看来，一切理论科学总是力图用尽可能少的基本概念和逻辑上互不相关的基本假设（基本原理）为基础来建立理论体系。这些基本概念和基本假设就是科学观念，它们构成了科学理论的逻辑基础和基本框架。科学观念的提出离不开以

观察、实验为基础的感性经验的启示，但在很大程度上却包含着科学家的思维的自由创造。科学革命实质上就是科学观念的根本改造。爱因斯坦的这些观点是切中要害的。

列宁说过："……革命是一种最基本最根本地摧毁旧事物的改造，而不是审慎地、缓慢的、逐渐地来改造旧事物，尽可能少加以破坏"（《列宁选集》第四卷，人民出版社，1972年第二版，第575页）。列宁这段话里也有"根本"二字。因此，需要强调的是，科学革命是科学观念的根本改造，而不是局部的、表面的改造，也就是说，在摧毁了的旧科学观念的废墟上建立新科学观念，并进而构筑新理论体系，而不是改良或修补。因而，科学革命也必然表现为一种整体性的革命。

在热力学和电磁学的建立过程中，虽然也曾引入了一些新的基本概念和基本原理（热力学第二定律、场），它们本来与经典力学不相容，但最终还是被纳入经典力学的理论框架之中。因此，热力学和电磁学的建立不能看作是一次革命，至多只能看作是一种局部性的变革。

并非所有的新实验和新理论都具有革命性，只有那些能引起科学观念发生根本改造的新实验和新

理论才能引起革命的爆发。迈克耳孙-莫雷实验本来有可能成为革命的导火线，但在当时，它只是对静止以太说提出了异议，长时间人们对它一直没有作出正确的解释，它只是带来了麻烦，并没有引起革命性的变革。X射线的发现却触动了传统的物质不可入的观念，但是更重要的是，它迅速导致了放射性的发现，促使元素嬗变理论的提出，从而一举改变了千百年来原子不可分、不可变的旧科学观念，因此我们把它看作是世纪之交物理学革命的序幕。出于同样的理由，爱因斯坦的狭义相对论是革命性的，而闵可夫斯基的四维时空理论只不过是爱因斯坦理论的合理外延。普朗克1900年10月提出的分布公式并没有引起革命，而同年12月作用量子假设的引入，却标志着物理学一个领域革命的开始。关于物理学革命，我们在这里显然强调了两点：一是物理学的基本概念和基本原理要得到改造，二是这种改造必须是根本性的。

科学革命并不是完全抛弃旧的理论，而只是改变了理论的基本框架，使新理论不仅能容纳旧理论所包含的全部知识，而且能容纳旧理论所不能包括的"反常"知识。而且，旧的科学观念也并非统统被废弃，其中一些只是丧失了自己以前独有的统治地

位，从以前的不正确的、与事实不符的壳体中解放出来，被赋予新的意义，它们原有的真理颗粒继续被保留下来，并作为从属成分有机地溶入新科学观念中。

从世纪之交的物理学革命来看，基本概念和基本原理的改造通常有以下的方式。第一，彻底取代。如超距作用论被媒递作用论取代，原子不可分的观念被原子有内部结构的观念取代。第二，旧名新义。如经典理论中的质量、惯性、时间、空间等概念在相对论中已被赋予新的含义。第三，合理推广。如力学中的相对性原理在狭义相对论中被推广到光学和电磁学，在广义相对论中又被推广到加速参照系。第四，辩证综合。如光的微粒说和波动说被综合为波粒二象性，分立的粒子概念和连续的场的概念被综合为物质波的概念。第五，包容蕴含。如能量子概念否定了“自然无飞跃”的传统观念，但这只在微观现象中才显示出来，在经典系统中，由于h很小，使得分立的能量实际上无法区分，这时能量的连续作为极限情况被包括在新概念内。第六，标新立异。如光速不变原理、等效原理、几率波、测不准关系、泡利不相容原理等都是这样，在经典科学观念中没有与之对应的东西。

科学观念的根本改造必然导致整个理论体系的

重建，导致自然观和科学方法的变革。例如，物理学革命的历史表明，适应于科学幼年时代的以归纳为主的方法把很大的地盘让给探索性的演绎法。在这里，尽管所观察到的事实无疑还是最高的裁决者，但是公理同它们的可证实的结论被一条很宽的鸿沟分隔开来，在没有通过极其辛勤而艰巨的思考把这两者连接起来之前，它不能作出裁决。因此，科学家必须自由发挥他的想象甚至幻想，才能超越二者之间的逻辑上不可逾越的鸿沟，建立起理论体系的逻辑基础，从而演绎出可供实践检验的具体结论。

四、科学的发展与政治、经济、生产、技术、思想文化等外部因素密切相关。但是，科学的发展也有其相对的独立性，它的发展的内在动力是实验和理论的对立统一、各种理论体系之间的对立统一，特别是后一种对立统一，在物理学革命中表现得十分明显，显示出日益增长的作用。

本书主要着眼于物理学的内部发展（科学内史），很少涉及到外部因素的影响（科学外史），但这并不是说外部因素无足轻重。事实上，物理学三个领域的革命之所以发端于德国（或广义地讲，是德语世界，因为爱因斯坦1901年已加入瑞士国籍，但

是在1914年，他又从苏黎世迁居柏林，任威廉皇帝物理研究所所长兼柏林大学教授），是有其深刻的社会背景的。1789-1794年的法国大革命如电闪雷鸣般地震撼了德国，民主自由的呼声和民族统一的要求日渐高涨，德国资产阶级反封建的情绪日益加强，由君主政权实行的自上而下地把地主经济变为资本主义经济的改良运动也逐渐进行着。特别是1871年德意志帝国的建立（由二十二个邦和三个自由市组成），为形成统一的国内市场和独立的经济体系创造了条件，促进了资本主义工农业的迅速发展。70-80年代，德国完成了工业革命，成为现代化的工业国。煤炭工业、冶金工业和机器制造业在欧洲处于支配地位，化学工业、电气工业、光学工业等新兴工业也在欧洲占优势地位。德国科学家兴隆时期是随着柏林大学成立（1809年）而开始的，一直到1933年希特勒上台为止，在世纪之交，世界科学的活动中心是德国。而且，德国人在那个时代也具有理论思维的传统（康德、黑格尔、高斯等就是其中的杰出代表），在自然科学走进了理论领域，这一点尤为重要，因为经验的方法在这里就不中用了，只有理论思维才能有所帮助。这一切，是物理学革命在德国爆发的必要条件。

以量子革命为例，这件事发生在德国绝非偶然。在十九世纪末叶，德国工业的发展促进了城市的繁荣，城市照明便成为一个急待解决的问题。煤气灯的网罩、白炽灯丝的亮度、能量的分布、标准光度的制定，尤其是照明的经济性都与热辐射有关。从1870~1871年普法战争之后，德国从法国夺取了阿尔萨斯和洛林，这两个地区丰富的铁矿与德国鲁尔的煤矿区连成一片，大大加速了钢铁工业的发展，高温作业和加热技术都极其需要高温测量方法的研究。与英国不同，德国的工业革命姗姗来迟，由于没有旧技术、旧设施的拖累，所以具有采用新技术成果实现工业化的有利条件，也具有技术改良和工业教育的迫切要求。1884年，以亥姆霍兹为所长的帝国物理技术研究所成立了，它很快就成为热辐射的研究中心，聚集了象维恩、卢梅尔等一批杰出的物理学家。假使没有这些客观条件，普朗克又怎能作出他的划时代的发现呢？

实验和理论的对立统一作为科学发展的内在动力是根本的，也是显而易见的。但是，世纪之交的物理学革命表明，各理论体系之间的对立统一也是科学发展的一种不可忽视的内在动力，它有时也会导致新概念或新理论的提出。从狭义相对论、广义

相对论、光量子、物质波概念的提出都可以看到这一点。之所以能这样，大体有以下几方面的原因。首先，客观世界是统一的，作为反映客观世界运动规律的理论必然具有某种内在的联系。这是从表面上的对立入手，追求本质上统一的理论的客观基础。其次，自伽利略、牛顿革命之后，物理学经过二百多年的发展，已形成经典力学、经典热力学、经典光学和经典电动力学等完整的理论体系，谋求它们的统一已具备了客观条件。最后一点是，到十九世纪末，物理学理论已发展到较高的水平，以归纳为主的方法正在让位给探索性的演绎法。作为演绎前提的基本概念和基本假设变得愈来愈抽象，愈来愈远离感觉经验。仅仅通过实验，用构造性的努力去发现真实定律是相当困难的，甚至是不可能的。着眼于各理论体系之间的对立统一，往往能创出新路。

各理论体系之间的对立统一能作为一种举足轻重的内在动力也与实验本身的“局限性”有关，其主要表现有以下几个方面。

第一，由于种种条件的限制，有关实验在一定的历史时期内不可能实现或一时难以完成。如果要等实验与现有科学理论发生尖锐矛盾时再立足于实验事实进行研究，势必大大延缓科学发展的进程。

在这种情况下，从旧有理论体系之间的矛盾入手，往往能取得突破。这一点在相对论的诞生中表现得尤为明显。

第二，有些实验由于设备复杂、要求精度很高等原因，其他人往往难以重复，这样便难于及时得到科学界的公认和受到应有的重视。例如，迈克耳孙1879年就采纳了麦克斯韦关于度量太阳系相对以太运动的建议，他的准备工作是在柏林进行的，由于运输时的振动，实验拖到1881年才在波茨坦进行。因为计算上的失误，他的零结果几乎没有引起多大反响。1887年，他和莫雷合作，以更高的精度重复了这一实验。这次实验尽管看不出什么破绽，但也未受到高度重视，不少人还认为实验不够完善。在1900年巴黎国际物理学会议上，开耳芬敦促莫雷和米勒（D.C.Miller）另做一次实验，以便得到一个比1887年实验更为肯定的结果。米勒为此花费了二十五年时间，才得到令人满意的证明。

第三，科学家（包括实验者本人）对新实验的认识有一个曲折的过程，特别是那些触及传统观念的实验，其深刻意义往往需要很久才能被揭示出来。一个理论家对实验“反驳”的典型作法不是抛弃旧有的理论，而是保留旧理论，同时力图修改与“反驳”

有关的辅助假定和观察假定，希望把“反驳”仅仅作为表面的而解释过去。人们对待迈克耳孙-莫雷实验的态度就是这方面一个很有说服力的例子。在当时人们的心目中，洛伦兹的“收缩假说”已使难题得到解决。该实验既未否定以太或绝对参照系的存在，甚至也没有否定一般的静止以太说。所谓否定这两者的看法只不过是狭义相对论深入人心后的事后认识而已。

第四，当一种潮流来到时，一些错误的所谓“实验发现”也纷纷“问世”，搞得科学家真假难辨，不知所措。例如，在放射性发现的热潮中就曾出现过这种情况。

但是，实验依然对有些理论的提出具有直接的指导作用，而且实验毕竟是鉴别科学理论正确与否的最终标准。现有理论体系之间的对立统一固然可以成为提出新理论的突破口，但现有理论体系也是建立在大量的实验基础之上的。诚然，从实验到基本概念和基本原理的建立不存在逻辑道路，只能通过尝试性的摸索才能达到，但是这种尝试却受支配于对实验事实作缜密的考察，从来没有一个真正有用的和深入的理论果真是由纯粹思辨发现的。例如，爱因斯坦创立狭义相对论固然主要是从力学和电动

力学之间关于运动相对性的不对称着眼的，但也多少受到光行差现象和非索实验的启迪。广义相对论的提出虽则基于把相对性原理贯彻到底的信念，但是等效原理的提出显然受到厄缶实验的启示。因此，我们说实验和理论的对立统一是物理学发展的根本的内在动力。

五、哲学对科学发展具有重要的作用，特别是在科学大变革时期，其作用更为突出。

列宁说过，当自然科学“处于各个领域都发生那样深刻的革命变革的时期”，“自然科学无论如何离不了哲学结论”（《列宁选集》第四卷，人民出版社，1972年第二版，第610页）。这是因为，在科学危机与革命时期，作为科学研究指导思想的旧科学观念业已摇摇欲坠，新科学观念尚未出现或尚未确立，科学家手中缺乏破旧立新的思想武器。于是，他们只好转向哲学分析，求助哲学指导来完成革故鼎新的大业。在这个非常时期，没有对自然科学的哲学分析，科学的进一步发展将是不可能的。

世纪之交的物理学革命清楚地表明，把哲学认识论和对自然规律的实际探索及创立新科学理论结合起来，这是在科学上富有开拓精神的物理学家们

共同遵循的原则。对这些物理学家来说，认识论能动地指导他们的科学实践，使他们在科学上有所建树；而科学成果又反过来加深了他们对认识论的理解。爱因斯坦、玻尔等人就是使科学与哲学珠联璧合、相得益彰的杰出代表。

在科学处于革命变革之中时，哲学能够起到那些作用呢？从世纪之交的物理学革命来看，哲学显著地起着批判、探索、创新、解释的作用。

旧科学观念都以传统哲学作为它的赖以存在和巩固的基础，这些东西牢牢地禁锢着科学家的头脑，使他们墨守成规，不敢逾矩，成为科学发展的严重桎梏。十九世纪末期的情况表明，物理学的进一步发展越来越不能没有哲学批判。只有运用哲学批判的武器，才不致成为传统哲学的奴隶，而且才能揭示出旧概念和旧原理的固有弱点，促使人们用新概念和新原理代替它们。马赫立足于经验论对经典力学的批判就是一个典型的例子。

在科学急剧变革的时期，为了解释新的实验事实，各种假设和理论大量涌现出来，各个学派也展开激烈的论争，这是一个令人困惑的、是非难辨的时期。在这种情况下，哲学作为一种定向工具，往往能使科学家看准方向，“直挂云帆济沧海”，到

达胜利的彼岸。薛定谔说得好："当我们在知识的道路上迈进的时候，我们必须让形而上学的无形之手从迷雾中伸出来指引我们，但同时也得每时每刻保持警惕，以防止形而上学的诱惑把我们引离正道而坠入深渊。"普朗克下面这句话是尽人皆知的："研究人员的世界观将永远决定着他的工作方向。"普朗克转入黑体辐射研究，卢瑟福之所以能在不长时间内提出嬗变理论，都是因为正确的哲学思想给他们指出了前进的方向。此类例子，不胜枚举。

在创立新的科学观念时，已有的实验事实常常不够充分，而且从实验到科学观念之间，还隔着一条难以逾越的鸿沟。这时，科学家往往求助于哲学思维，就会较快地获得启迪，使问题迎刃而解。哲学作为创新手段在世纪之交的物理学革命中是屡见不鲜的。

一种新理论提出之后，只有给以恰当的哲学解释，才能够坚定提出者的信念，也便于为他人所接受。因为在科学革命中诞生的重大理论，都包含着科学观念的根本变革，而新的科学观念又往往具有某种哲学意义，需要作出恰当的哲学解释。

哲学所具有的这种批判、探索、创新、解释作用，已为物理学家所认识。爱因斯坦意味深长地

说："如果把哲学理解为在最普遍和最广泛的形式中对知识的追求，那末，显然，哲学就可以被认为是全部科学研究之母。""认识论同科学的相互关系是值得注意的。它们互相依存。认识论要是不同科学接触，就会成为一个空架子。科学要是没有认识论——只要这真是可以设想的——就是原始的混乱的东西。"玻恩也深有体会地说过："每一个现代科学家，特别是每一个理论物理学家，都深刻地认识到自己的工作是同哲学思维错综地交织在一起的，要是对哲学文献没有充分的知识，他的工作就会是无效的。在我自己的一生中，这是一个最重要的思想。"劳厄在"我的物理学道路"一文中曾作了一段坦率的哲学自白。他说："不过，我真正成熟到我懂得哲学，我想还是在大学的时候。从那时起，哲学竟从根本上把我的生命存在重新改造了一番，甚至我觉得物理学的真正价值也在于它为哲学提供了一种重要的手段。我认为，整个科学必须围绕着哲学来活动，把哲学看成是它们共同的中心，把对哲学作出自己的贡献看成是整个科学的本来宗旨所在。这样，也唯有这样，面对科学的不断专门化，科学文化的统一性才能保持下去，因为倘若没有这种统一性，那么整个文化就注定会崩溃的。"

总而言之，“不管自然科学家采取什么样的态度，他们还是得受哲学的支配。问题在于：他们是愿意受某种坏的时髦哲学的支配，还是愿意受一种建立在通晓思维的历史和成就的基础上的理论思维的支配”（恩格斯：《自然辩证法》，人民出版社，1971年第一版，第187页）。物理学革命的历史表明，唯心主义是一个泥潭；自然科学的唯物主义又是一种“自发的、不自觉的、不定型的、哲学上无意识的信念”（《列宁选集》第二卷，人民出版社，1972年第二版，第353页），它具有较大的局限性。只有唯物辩证法“才能为自然界中所发生的发展过程，为自然界中的普遍联系，为从一个研究领域到另一个研究领域的过渡提供类比，并从而提供说明方法”（恩格斯：《自然辩证法》，人民出版社，1971年第一版，第28页）。因此，自然科学家应当做一个辩证唯物主义者，只有这样，才能抵挡坏的时髦哲学的侵袭，在科学探索中方向明确。

六、不同学派的自由争鸣是科学繁荣的重要保证。

在十九世纪末，批判学派和机械学派（力学学派）的争鸣导致了对经典理论的科学与哲学基础的

生气勃勃的讨论，为物理学革命的到来开辟了思想道路。本世纪二十年代开始的哥本哈根学派和爱因斯坦等人的争鸣是二十世纪物理学的主要思想斗争之一，它不仅推动了量子力学的深入发展，而且对以后的物理学和哲学的发展都产生了深刻的影响。

学派是在争鸣中逐渐形成的。它大凡都有自己杰出的代表人物，独创的学术见解和独特的研究风格。学派的建立，使各派先驱者的思想迅速传播开来。同时，在互相诘难的过程中，又促进了学术思想的交流，推动了科学的发展。

学派之间的是非，只有通过自由争鸣才能得到解决，利用某些人为的力量，强行推行一个学派，压制另一个学派，结果只能适得其反，不利于科学的发展。真理愈辨愈明，是非越争越清。历史的发展有其必由之路，往往不以人们的意志为转移。

学派之间的争论，情况常常非常复杂。这里既有认识过程的是非之争、新旧之争和不同见解之争，又有学术观点和方法上的唯物论和唯心论、辩证法和形而上学之争，有时甚至两者交织在一起。因此，必须进行细致的分析，既不能忽视学派争论中存在着的世界观性质的问题，也不能把一切学术争论都提到世界观的高度来看待。即使对于唯心论

学派，也不能不分青红皂白予以全盘否定，而要善于发现它的积极因素，批判地汲取其中的合理成分。爱因斯坦对待批判学派的态度为我们提供了一个良好的范例。

一般说来，不同的学派的观点和理论都以自己的科学材料和科学成果为依据，因而都或多或少地具有自己的长处和短处，争鸣的最终结局往往是取长补短，相互融合。即使一个学派在某一方面失败了，也要历史地看问题。而不应该把它说得一塌糊涂、一无是处。例如，关于世纪之交分子、原子是否存在的争论，批判学派显然错了。但是约尔丹说得好："今天，我们当然都知道，那时候怀疑原子的真实存在是错误的。不过，当时批评者们强调，为了最终能够承认原子的真实存在，就务必要找到一种关于它的真正的证明，这也是对的。但是，事实上直到本世纪初，还一直没有找到这类证明。这就是为什么这些批评在当时如此使人震惊的原因，而且，这种批评也的确产生了良好的有益的作用。它促使那些天才的科学家们去进行试验和探索物质存在的最深层次的竞赛，在这个层次中，原子作为一种在实验上可以达到的实在能够最终被发现。"

七、物理学的发展永无止境，物理学的前景永远光明。

当前，在英国剑桥学派中，一种流行的看法是：理论物理学的终点已经在望，理论物理学家的末日即将来临。按照他们的“终结论”，人们在不久的将来就可能发现一组完全的、自洽的、统一的相互作用理论，它能描述宇宙的所有可能的物理观察。

“无可奈何花落去，似曾相识燕归来”。类似的“终结论”在十九世纪末也盛极一时，可是曾几何时，物理学革命的急风暴雨就冲走了这朵“无可奈何”的“落花”。看来，“终结论”这个又归来的“似曾相识”的“新燕”也不会驻留多时。

众所周知，物理学研究的是有关物质结构和物质运动的根本规律，是在自然界普遍起作用的规律。自然界的事物千姿百态，自然界的现象千奇百怪，物理学怎么能一下子把无穷无尽的自然界的一切根本规律都弄个水落石出呢？

目前，有许多亟待解决的重大问题摆在理论物理学的面前：“色”为什么禁闭？弱作用、强作用、电磁作用和引力作用能否统一，如何统一？引力能否量子化、重整化，引力场是否是规范场？相对论与量子论的基础如何协调？如何解释多种夸克、反

夸克（目前已知有36种）、多种轻子（目前已知有12种），有无更深层次的结构？是否存在引力波？如何理解黑洞的奇性？是否有超光速的粒子（快子）？不仅如此，天体物理学也将一系列的问题摆在理论物理学的面前：为何太阳的中微子发射比预期值小得多？γ射线爆发、X射线爆发的机制是什么？为何许多射电源具有规则的成双结构？类星体、活动星系的能源是什么？为何某些星系的天体系统结构非常有序？为何几种最长的时标（哈勃常数倒数、球状星团年令、同位素年代学的结果）都差不多是10^{10}年？为何我们周围极少有天然的反物质？为何各种物理常数在很大的时空范围内是不变的？为何我们所在的天区空间是三维的而时间却是一维的？时间是基本量还是次级量？当然，使物理学家深为困惑的问题远远不止这些，它们大大超过了上世纪末的“两朵乌云”，尽管它们还没达到上世纪末那样的“黑云压城城欲摧”的程度。这些问题的解决也许将会引起新的物理学革命，使人类对物质世界的认识深化一步。

自然是无限多样的，而人的认识在一定的历史阶段却是有限的。“每一个人的思维所达到的认识的至上意义”“是根本谈不上的，而且根据到目前

为止的一切经验看来，这些认识所包含的需要改善的因素，无例外地总是要比不需要改善的或正确的因素多得多。”就整个人类而言，“人的思维是至上的，同样又是不至上的，它的认识能力是无限的，同样又是有限的。按它的本性、使命、可能和历史的终极目的来说，是至上的和无限的；按它的个别实现和每次的现实来说，又是不至上的和有限的。”“这个矛盾只有在无限的前进过程中，在至少对我们来说实际上是无止境的人类世代更迭中才能得到解决。”因此，人类不可能“在某个时候达到只运用永恒真理，只运用具有至上意义和无条件真理权的思维成果的地步”，不可能在某个时候达到“知识世界的无限性就现实和可能而言都穷尽了”的地步（《马克思恩格斯选集》第三卷，人民出版社，1971年第一版，第125-126页）。历史同认识一样，永远不会把人类的某种完美的理想状态看作是尽善尽美的，尽善尽美的包罗万象的物理学理论只能是在幻想中才存在的东西。黑格尔就科学的发展说过一段寓意深刻的话，“科学表现为一个自身旋绕的圆圈，中介把末尾绕回到圆圈的开头；这个圆圈以此而是圆圈中的一个圆圈；因为每一个别的支节，作为方法赋予了灵魂的东西，都是自身

反思，当它转回到开端时，它同时又是一个新的支节的开端。”

历史的经验值得注意，十九世纪末流行的“终结论”的破产这一教训值得记取。J·J·汤姆孙尽管在当年是一位具有较多保守气息的科学家，但也曾为当时的物理学革命形势所鼓舞。他在1909年英国科学促进协会的主席演说中，几乎不是从个人角度，而是从当时掌握了第一手材料的学者的角度进行了评论：“过去几年中，在物理学中所做出的新发现以及由这种新发现所表现出的观念和潜力，影响到渊源于文艺复兴在文化中所产生出的那些科学工作。热情被激发起来了，到处充满了希望，充满了青春的活力和充沛的精力，这一切使人们满怀信心地去做实验，这些实验在二十年前会被认为是异想天开。当时流行的下述悲观情绪已经一扫而光：所有感兴趣的事物都被发现了，留下来的一切只是在一些物理常数中变更一两位小数。从来也没有这种感觉的正当理由，从来也没有接近科学终点的任何迹象。现在，知识的总和无论如何是一个发散序列而不是一个收敛序列。”J·J·汤姆孙的经验之谈是值得深思的，他最后的结论难道不是被迄今的物理学发展所证实了吗？历史固然不等于现实和未来，

但历史毕竟是现实和未来的一面镜子。历史的辩证法往往是这样：正当你感到“山穷水尽疑无路”之时，只要再向前迈出一步，就可望进入“柳暗花明又一村”的胜景之中。何况当前物理学的发展并没有面临“疑无路”的境况，它眼前的路还长着呢！因此，停止的论点，悲观的论点，无所作为和骄傲自满的论点都是错误的。事实上，我们无知的总和远远大于我们已知的总和，“终结论”显然是一个过于匆忙的结论。

象历史上的J·J·汤姆孙一样，当前西方科学界的一些有识之士也对“终点论”提出异议。阿马尔迪（E.Amaldi）认为，包罗万象的理论其结果常常是僵硬的，它不能容纳新发现或新概念，最后没有不失败的。邦迪（Bondi）也说，今天还有些人企图发现能回答一切的“世界方程”，可是能够回答一切的方程那就什么也回答不了。这是因为，在这个千变万化的世界里，如果形形色色的事物都能从一个方程里冒出来，那么从该方程到所观测的事物之间，其间经过的路程必然长得可怕，因此特别难于处理。温伯格（Steven Weinberg）曾经指出，实际上宇宙不仅比我们已经知道的离奇得多，而且还比我们所能知道的离奇得多，我相信这

是真的。诚然，宇宙的安排好象并不把人类放在心上，可是人类却能为宇宙建立数学模型并看到这些模型在起作用。但是，假若以为我们按照伽利略方式（即为宇宙建立抽象的数学模型）搞物理学，终于认识了一切自然规律，终于认识了自然界所有事物的来龙去脉，那才是世界上最离奇的事呢！

物理学的发展永无止境，物理学的前景永远光明。德布罗意深有体会地说："我们任何时候都不应忘记（科学史证明了这一点），我们认识的每一个成果提出的问题比解决的问题还要多。在认识领域内，新发现的每一片土地都可以使我们推测到，还存在着我们尚未知晓的无边无际的大陆。"恩格斯则从更高的哲学视野上断言："科学从认识的较低阶段上升到较高阶段，愈升愈高，但是永远不能通过绝对真理的发现而达到这一点，在这一点上它再也不能前进一步，除了袖手一旁惊愕地望着这个已经获得的绝对真理出神，就再也无事可做了。"（《马克思恩格斯选集》第四卷，人民出版社，1972年第一版，第212页）

一九八二年十月初稿于北京友谊宾馆
一九八三年三月修改

作者后记

伏案多日，这本小书终于改定脱稿。此时，我不由自主地回想起那动荡而迷惘的年月。是在大学第二学年即将结束的时候，一阵风暴把人们一古脑儿捲入无底的深渊。多少个日日夜夜，我困惑、彷徨、冥思、求索。

一九七六年十月，在中国历史上是一个不平凡的岁月。从此以后，“木欣欣以向荣，泉涓涓而始流”，万物逐渐呈现出一派生机。没多久，党和国家决定恢复研究生招生制度，我有幸于一九七八年十月考入中国科技大学研究生院，攻读科学哲学与科学思想史专业，从此开始走上学术研究的道路。其时已人到中年。

我记得一句古语：“往者不可谏，来者犹可

追”，于是便不畏劳苦地在科学的崎岖小路上攀登。这本小书的多数材料，就是在研究生院作硕士论文的过程中一点一滴地积累起来的。

本书立足于世纪之交物理学革命的历史考察。尽管作者在撰写时参阅了英、日、俄等语种的两百余种文献，但在浩如烟海的资料面前，难免买椟还珠，挂一漏万。本书也力图运用马克思主义的立场、观点和方法，对这一时期的重大历史事件进行哲学分析，提出了一些不同于传统观点的估价和看法。众所周知，世纪之交的物理学革命，无论在科学史上还是在哲学史上，都是十分引人注目的。近百年来，评者蜂起，众说纷纭。作者才疏学浅，贸然从事这项工作，似有目不见睫之嫌。但是，为了收到抛砖引玉的效果，现将这些冗词赘句和盘托出，切望专家和读者不吝指教。

为节省篇幅起见，作者未能将参考文献全部列出。在这里，谨向有关文献的作者和译者——中国的、外国的、活着的、逝去的——深表谢意。

在求学期间，许良英导师等人严谨的治学态度和扎实的治学方法使我获益匪浅。在这本小书将要问世之际，我从心里感激他们的谆谆教诲。

我还要感谢《走向未来》丛书编委会和中国科

学院《自然辩证法通讯》杂志社的有关同志，特别是何维凌、刘青峰、金观涛、贾新民、黄亚萍同志，他们对本书的写作给予了大力支持。李少文同志为本书绘制了插图，在此一并致谢。

改完书稿，京华正值阳春三月。我情不自禁地又欣然命笔——

绿柳乍黄又一春，回首流年入梦频。
人生有涯学无垠，莫作后之视今人*。

李醒民

一九八三年三月二十九日于北京

---

*晋人王羲之《兰亭集序》有“后之视今，亦犹今之视昔，悲夫！”的句子。